CANADIAN POLAR COMMISSION
COMMISSION CANADIENNE DES AFFAIRES POLAIRES

Canadian Committee for Antarctic Research
Comité canadien de recherches antarctiques

EXPLORATION DES LACS SOUS-GLACIAIRES ET DES GLACES PROFONDES : EXPERTISE CANADIENNE EN ANTARCTIQUE ET POSSIBILITÉS INTERNATIONALES

Compte rendu d'un colloque international
tenu à la
Commission canadienne des affaires polaires
Ottawa (Ontario)
17-18 mars 2001

Révisé par Olav H. Loken et Nicole J. Couture

Canada

This document is also available in English.

Avant-propos 1

1 Déclarations préliminaires 2

1.1 Bienvenue 2

1.2 Contexte et justification du colloque
Warwick Vincent 2

2 Recherche actuelle et future sur les lacs sous-glaciaires et les glaces profondes 4

2.1 Activités internationales 4

Occasions d'exploration des lacs sous-glaciaires à l'échelle internationale
Mahlon C. Kennicutt II 4

Étude des carottes de glace dans la perspective de l'exploration du lac Vostok
Jean Robert Petit 6

Physiographie des lacs sous-glaciaires de l'Antarctique
Martin J. Siegert 9

2.2 Activités canadiennes 12

La vie dans le lac Vostok
David Bird 12

Projet d'échantillonnage d'un lac sous-glaciaire du Pôle Sud
Erik Blake 14

Le lac Vostok, table rase et défi multidisciplinaire
Garry K. C. Clarke 16

Analyse des carottes de glace de l'Arctique canadien et du Yukon
David A. Fisher et Roy (Fritz) Koerner 18

Genèse et croissance modelée de l'inlandsis antarctique
Examen de modèle imbriqué d'équilibre énergétique sous-glaciaire de la région du lac Vostok
Shawn J. Marshall 20

Activités de recherche sous-glaciaires et dans les glaces profondes
Wayne Pollard 22

Activité microbienne sous les nappes glaciaires et ses effets sur l'environnement sous-glaciaire
Martin Sharp, Julia Foght 22

Virus indicateurs dans la glace profonde et lacs sous-glaciaires indicateurs de changement climatique mondial
Curtis Suttle....24

Écologie microbienne polaire
Warwick F. Vincent....25

3 Progrès relatifs aux intérêts canadiens dans la recherche sur les lacs sous-glaciaires et les glaces profondes en Antarctique
Nicole Couture....26

4 Mot de la fin
Warwick Vincent....30

Références....31

ANNEXE A – Participants au colloque....36

ANNEXE B – Liste des sigles....39

Avant-propos

En Antarctique de l'Est, la nappe de glace recouvre de nombreux lacs sous-glaciaires. Une grande partie de la recherche sur ces lacs porte sur le lac Vostok, un grand lac situé à presque 4 km sous la glace. Un programme de forage à la station Vostok, au-dessus du lac, a permis de prélever une carotte de glace à une profondeur encore jamais atteinte, ce qui a fourni aux scientifiques des renseignements détaillés sur le climat aux époques passées ainsi que des précisions sur les sédiments et les microbes que pourrait renfermer le lac. La communauté scientifique internationale compte faire d'autres études et, en 1999, le Comité scientifique pour les recherches antarctiques (CSRA) a tenu un colloque à Cambridge, au R.-U., afin d'établir un plan scientifique pour l'exploration des lacs sous-glaciaires.

Des scientifiques canadiens ont participé aux analyses des matières provenant du lac Vostok, en général parce qu'ils y avaient été invités par des groupes de chercheurs de l'étranger, notamment des É.-U. Cependant, auparavant on n'avait jamais tenté de créer des liens entre les scientifiques canadiens intéressés. Afin d'examiner cette situation, le Comité canadien de la recherche antarctique (CCRA), estimant que nous pouvions tous profiter de la synergie du partage des idées et de l'exploration des sujets d'intérêt commun, a tenu un colloque en mars 2001, pour réunir les scientifiques canadiens et leurs homologues de l'étranger qui voulaient approfondir la question des lacs sous-glaciaires et des glaces profondes. En outre, le colloque faisait suite à une recommandation du colloque de Cambridge selon laquelle les responsables des programmes antarctiques nationaux devaient mesurer le degré d'intérêt de leur pays respectif pour l'exploration des lacs sous-glaciaires.

La Commission canadienne des affaires polaires (CCAP) a fourni une aide financière et des ressources pour le colloque, et le ministère des Affaires étrangères et du Commerce international (MAECI) a aussi contribué par l'entremise de son Programme scientifique et technique Horizon le monde. Nous les remercions pour leur aide.

Olav. H. Loken et Nicole Couture
Mai 2001

1 Déclarations préliminaires

1.1 Bienvenue

Olav H. Loken
Secrétaire, Comité canadien de la recherche antarctique

Au nom de Steve Bigras, directeur exécutif de la Commission canadienne des affaires polaires (CCAP), qui n'a pas pu assister au colloque, M. Olav Loken a souhaité la bienvenue aux participants aux bureaux de la Commission. La Commission canadienne des affaires polaires est chargée : de promouvoir et diffuser la connaissance des régions polaires et suivre son évolution; d'aider à sensibiliser le public à l'importance de la science polaire pour le Canada; d'intensifier le rôle du Canada sur la scène internationale à titre de nation circumpolaire et de recommander l'adoption d'une politique sur la science polaire par le gouvernement. La CCAP représente le Canada auprès du Comité international pour les sciences arctiques (CISA) et depuis 1994, elle le représente aussi auprès du Comité scientifique pour les recherches antarctiques (CSRA). Le CSRA est chargé d'entreprendre, de promouvoir et de coordonner les travaux de recherche scientifique en Antarctique et de fournir des conseils scientifiques relativement aux traités sur l'Antarctique.

En tant que membre du CSRA, la CCAP est chargée de défendre les intérêts du Canada en rapport avec la science antarctique et bipolaire et de communiquer l'information pertinente aux chercheurs du Canada qui s'intéressent aux questions polaires. Pour conseiller les intéressés sur ces questions et sur d'autres questions ayant trait à la recherche dans la région antarctique, et pour que les chercheurs canadiens participent aux activités de planification cruciales et encouragent la coopération internationale en recherche antarctique et bipolaire, la Commission a créé le Comité canadien de la recherche antarctique (CCRA) en tant que comité antarctique national du Canada, selon les règles du CSRA. Ainsi, le CCRA assure la liaison entre la communauté scientifique antarctique internationale et les scientifiques canadiens qui font de la recherche antarctique et(ou) bipolaire ou qui aimeraient s'engager dans cette voie. En outre, le CCRA est l'organisme consultatif national sur les dossiers antarctiques, qui relève de la CCAP.

1.2 Contexte et justification du colloque

Warwick Vincent
Président, Comité canadien de la recherche antarctique

Le forage du trou à une profondeur de 3,6 km dans la nappe glaciaire en Antarctique de l'Est, à la station Vostok, la découverte du lac sous-glaciaire Vostok et les rapports à propos de l'existence de microbes vivants dans la glace profonde, à Vostok, ont suscité un grand intérêt dans la communauté scientifique internationale et dans les médias (CSRA, 2000). Ces découvertes ont soulevé de nombreuses questions sur la nature physique, chimique et biologique des lacs, leur histoire retracée dans les sédiments du lac, et l'existence possible de formes de vie dans les environnements extrêmes. On a aussi repéré plus de 70 autres lacs sous-glaciaires sous l'inlandsis antarctique (Siegert et al., 1996). Le groupe de scientifiques de divers pays qui s'intéressent à l'Antarctique, coordonné par le CSRA, dresse des plans pour la réalisation d'autres études et l'éventuel prélèvement d'échantillons de ces lacs et de la glace qui

les recouvre. Donc, il importe que le Canada signale son expertise en science et technologie de la « glace extrême » et examine les possibilités de participation canadienne aux initiatives internationales dans ces domaines.

Ces dernières années, des Canadiens ont participé aux divers aspects des analyses et des discussions à propos du lac Vostok. En 1999-2000, trois scientifiques canadiens ont rédigé, seuls ou avec d'autres, des articles sur le lac Vostok et la carotte de glace prélevée au moyen de forages. L'un de ces articles (Karl, Bird et al. 1999) figure parmi les « dix premiers » sur la liste annuelle des réalisations scientifiques récentes établie par l'équipe de rédaction de *Québec Science*. Une société d'ingénierie canadienne joue un rôle primordial au sein d'un groupe international qui met au point de nouveaux instruments devant servir à recueillir des échantillons non contaminés de glace, d'eau du lac et de sédiments (Blake 2000). D'autres Canadiens participent à des projets visant à faire avancer la connaissance scientifique sur les glaces de la planète Mars et des lunes de Jupiter (p. ex., Pollard et al. 2000). La glace profonde et les lacs sous-glaciaires de l'Antarctique sont considérés comme des analogues terrestres de phénomènes qui se produisent ailleurs dans le système solaire.

Trois facteurs rendent intéressant le travail sur les systèmes sous-glaciaires et la glace épaisse, et ils auront sans doute une influence sur la planification et la recherche. Le premier facteur est la multidisciplinarité. Les endroits où sont situés les lacs sous-glaciaires, la glace profonde et la nature de leur contenu rendent le sujet intéressant pour un grand nombre de spécialistes. La diversité des intérêts représentés à ce colloque ainsi que les disciplines interreliées, notamment la géomicrobiologie, l'hydrogéochimie et l'hydrodynamique des interactions glace-eau, reflètent la vaste gamme de projets qui pourraient être réalisés. Il existe donc des possibilités de contribution, et chacun pourra apporter sa propre perspective dans un ensemble beaucoup plus vaste de connaissances sur ces systèmes complexes d'eau-glace profonde.

Deuxièmement, des questions fondamentales et passionnantes se posent pour les spécialistes de chaque discipline. Cela nous intéresse, compte tenu des spécialités de chacun et des objectifs de la recherche à long terme. Les organismes de financement encouragent de plus en plus la multidisciplinarité, mais le maintien et le développement d'une expertise poussée demeurent essentiels. Les questions découlant de l'exploration des lacs sous-glaciaires et des glaces profondes prouvent qu'il pourrait y avoir des possibilités de contribuer d'une manière fondamentale à l'étude de questions comme l'évolution de la vie microbienne ou l'hydrodynamique et la géochimie des systèmes eau-glace. La connaissance fondamentale à cet égard a une importance considérable qui va bien au-delà de la compréhension des phénomènes et des processus propres aux régions polaires.

Enfin, l'exploration des lacs sous-glaciaires et des glaces profondes frappe l'imagination du public. Quand *Science* a publié trois articles et un commentaire à propos du lac Vostok (Jouzel et al., 1999; Priscu et al., 1999; Karl et al., 1999, Vincent 1999), cela a engendré une multitude d'articles dans les journaux, les revues et les sites web, de comptes rendus à la radio et de reportages à la télévision. L'exploration du lac Vostok comporte de nombreux aspects qui passionnent le public : un milieu éloigné, inhospitalier et jusqu'à tout récemment caché, un lieu propice aux voyages excitants, le rapport avec les questions concernant les mécanismes planétaires extraterrestres et toutes sortes de questions sur la vie. Tout cela pose un défi. L'augmentation de la recherche imputable au grand prestige sur la scène internationale entraînera vraisemblablement un chevauchement de l'expertise, et il faudra donc trouver des

projets innovateurs complémentaires qui s'intégreront à un plus vaste programme international. À ce colloque, nous devons nous demander quelle serait la meilleure façon pour le Canada de faire une contribution unique. Il importe de déterminer le genre d'expertise que les Canadiens peuvent promouvoir et développer au sein d'un système international coordonné, plus général.

Les buts de ce colloque : échanger de l'information sur l'expertise et les activités canadiennes en rapport avec l'étude des lacs sous-glaciaires et des environnements de glace extrêmes et examiner les futurs projets et possibilités de recherche dans ces domaines. Les objectifs particuliers sont les suivants :

1) déterminer l'expertise, trouver des contacts et examiner les possibilités de recherche et d'échange pour l'avenir. Cela inclura l'examen de certaines initiatives internationales et des groupes de discussion qui pourraient bénéficier de l'intervention canadienne;
2) cerner les intérêts communs et essayer de déterminer la meilleure façon de faire avancer le dossier dans un contexte national et international;
3) évaluer les options qui devront être poursuivies pour mieux coordonner l'intervention canadienne et la collaboration internationale à l'exploration des lacs sous-glaciaires et des glaces profondes.

2 Recherche actuelle et future sur les lacs sous-glaciaires et les glaces profondes

2.1 Activités internationales

Occasions d'exploration des lacs sous-glaciaires à l'échelle internationale

Mahlon C. Kennicutt II
Geochemical and Environmental Research Group, Texas A&M University

L'exploration des lacs sous-glaciaires frappe l'imagination des scientifiques et des non-initiés. Le haut degré d'intérêt provient des hypothèses sur l'existence possible de formes de vie dans le lac qui sont isolés depuis des centaines de milliers d'années et sur l'éventuelle ressemblance avec d'autres mondes recouverts de glace dans le système solaire, notamment sur Europe, une lune de Jupiter. Les projets d'exploration des scientifiques ont progressé, car toute une série de colloques sur la question a été organisée depuis 1996. L'article présenté cette année-là par Kapitsa et al. dans *Nature* (volume 381 : 684-686) a été le premier à susciter une grande publicité sur l'existence possible d'un grand lac sous la nappe glaciaire de l'Antarctique de l'Est. Après la parution de cet article, l'existence du lac a été signalée à l'assemblée tenue à Rome par le Comité scientifique pour les recherches antarctiques (CSRA). Après plusieurs colloques, l'activité a atteint son point culminant avec la tenue d'une réunion internationale à Cambridge, en 1999. Après cette réunion, les responsables ont dressé un plan scientifique, et les intéressés ont proposé d'adopter une approche graduelle pour l'exécution d'un programme d'exploration générale des lacs sous-glaciaires. Le compte rendu a été grandement diffusé (Kennicutt et al, 2000).

Selon le compte rendu et le plan scientifique, l'exploration sous-glaciaire doit résulter d'une participation internationale, faire appel à diverses disciplines et privilégier des techniques non contaminantes pour la pénétration du lac et le prélèvement d'échantillons, et le lac Vostok devrait être la cible ultime du processus d'exploration. Le compte rendu reconnaît que

l'exploration fructueuse des lacs sous-glaciaires demande un apport continuel de ressources considérables si l'on veut atteindre les objectifs scientifiques très diversifiés d'un tel programme. Un certain nombre d'objectifs scientifiques ont été décrits comme des objectifs relevant de trois catégories : la détection et la description des formes de vie qui existent dans le lac; la récupération d'indices sur les paléoclimats qui pourraient exister; et une meilleure compréhension de la tectonique de l'Antarctique. Le principal thème de la recherche tente de déterminer comment l'évolution de la vie et du climat et la tectonique ont servi à produire les milieux physiques/chimiques inhabituels actuellement appelés lacs sous-glaciaires.

Pour la réalisation d'un plan d'exploration, on sait qu'il faut surmonter de nombreuses difficultés. Un mécanisme de coordination internationale devrait être établi pour encourager la participation générale au projet selon un système de partage des frais d'exécution et de logistique. On sait aussi qu'il faudra surmonter des obstacles techniques majeurs et que la meilleure méthode est une approche graduelle qui inclut le financement des projets corollaires (comme les levés aériens), la mise au point de technologies et des tests dans des milieux analogues, l'exploration de plus petits lacs et, en fin de compte, la pénétration du lac Vostok. Les premières opérations de pénétration et d'exploration devraient probablement être réalisées par des techniques robotiques ou de télédétection, et le prélèvement d'échantillons pourrait être remis à plus tard, c'est-à-dire lorsque le travail initial d'exploration aura été accompli.

L'un des aspects qui demandent un investissement considérable est la mise au point de technologies d'exploration des lacs sous-glaciaires. L'éloignement et la difficulté de pénétrer le lac, le prélèvement d'une quantité d'eau, les interventions dans le lac et le prélèvement de sédiments – opérations pour lesquelles il faut d'abord franchir quatre kilomètres de glace – sans contaminer le lac présentent un défi de taille. On sait qu'une grande partie des technologies nécessaires n'existe pas encore. Ces technologies comprennent les méthodes d'accès (forages dans la glace), des systèmes et des procédures qui ne contaminent pas le milieu, la robotique et la technologie des capteurs in situ, les techniques de prélèvement des échantillons et la miniaturisation des capteurs et des appareils. Compte tenu de ces défis technologiques, il a été recommandé de faire d'abord des essais à des endroits analogues plus accessibles, dans les régions nordiques. Les plateformes de glace, les lacs gelés et les glaciers du Nord pourraient être des terrains d'essai propices pour les nouvelles technologies. Lorsqu'on en sera au lac Vostok, il serait utile de faire d'autres essais sur les plateformes de glace de l'océan Antarctique, dans des plus petits lacs qui sont davantage accessibles et dans des milieux semblables.

Les recommandations du colloque : que le CSRA constitue un groupe de spécialistes internationaux; qu'on encourage les scientifiques et les comités nationaux chargés de l'Antarctique à essayer d'obtenir une aide pour le programme dans leur pays et leur secteur; et demander au Conseil des directeurs des programmes nationaux relatifs à l'Antarctique (COMNAP) de fournir une aide à la mise au point de technologies et à la planification de la logistique. À l'assemblée du CSRA, à Tokyo en 2000, un groupe de spécialistes des lacs sous-glaciaires a été formé. En avril 2001, le groupe n'avait pas encore tenu de réunion officielle. Le COMNAP a remis à plus tard l'organisation d'un colloque technologique, estimant qu'il fallait d'abord mieux définir les problèmes. Divers pays sont en trains de former des groupes de travail et font progresser le dossier des lacs sous-glaciaires par l'entremise de leur organisme national et de leur mécanisme de soutien. Les É.-U. organiseront vraisemblablement une série de colloques pour se pencher sur des questions liées à l'exploration des lacs sous-glaciaires,

notamment la pénétration stérile et les méthodes de prélèvement d'échantillons, les techniques de forage, la robotique et les capteurs in situ.

À l'évidence, un programme général d'exploration interdisciplinaire est une entreprise d'envergure. On sait qu'il faudra compter au moins une décennie pour pouvoir atteindre les objectifs généraux. Cependant, les premières étapes ont débuté. Les É.-U. ont financé des observations radar aériennes améliorées du lac Vostok et comptent financer un vaste assortiment de projets connexes dans d'autres pays. Il faudra peut-être attendre un certain temps avant que les responsables se soient mis d'accord sur un mécanisme de collaboration internationale pour l'exploration des lacs sous-glaciaires, mais les intéressés devraient élaborer des plans pour contribuer aux nombreux enjeux qu'il faudra considérer en rapport avec cet ambitieux programme.

Étude des carottes de glace dans la perspective de l'exploration du lac Vostok (Antarctique)

Jean Robert Petit
LGGE-CNRS BP 96 F-38402 St Martin d'Hères Cedex France

Les carottes de glace provenant du Groenland et de l'Antarctique sont des mines de renseignements sur les paléoclimats de la période couvrant les derniers cycles glaciaires-interglaciaires. On obtient des informations sur la température et la teneur en constituants chimiques atmosphériques à partir des analyses de la composition isotopique ou chimique de la glace. De plus, cette glace possède l'unique propriété d'emprisonner des bulles d'air fossile. Pour être plus précis, la carotte du lac Vostok fournit des indices sur le climat pour les 420 000 dernières années, ce qui en fait la marque du passé sur la plus longue période jamais obtenue à partir de la glace. Elle dévoile que, durant cette période, le climat a oscillé entre les périodes glaciaires et interglaciaires, et la température moyenne de l'air a fluctué de 6°C. Comparées aux climats chauds des époques interglaciaires, les périodes glaciaires se caractérisent par une teneur plus élevée en poussières et en aérosols et des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère moins élevées. Les indices obtenus confirment aussi l'influence du forçage solaire et prouvent l'importance des gaz à effet de serre dans l'évolution du climat. De plus, ils font voir qu'à chaque déglaciation, le retrait glaciaire se produisait d'abord dans l'hémisphère Sud, puis dans l'hémisphère Nord (Petit et al., 1999).

À la station Vostok, la foreuse a atteint une profondeur de 3 623 mètres. Au-dessous de 3 310 mètres, la dynamique de la glace a perturbé la stratigraphie des couches horizontales, de sorte qu'il n'est pas possible d'obtenir des indices sur le climat. À 3 538 m, la foreuse a pénétré une couche de glace dont les propriétés sont très différentes de celles de la nappe glaciaire, au-dessus. Cette glace a une très faible conductivité électrique, contient de très grands cristaux de glace pouvant atteindre d'énormes dimensions (jusqu'à 1 m) et renferme des inclusions minérales visibles (de l'ordre du millimètre) qui proviennent de la roche de fond. D'après la composition isotopique de la glace, il a été conclu qu'elle a été formée par le regel de l'eau du lac, sur la face inférieure de la nappe glaciaire. (Jouzel et al., 1999). L'absence de gaz dans cette glace conforte le processus de formation par regel de l'eau du lac. On suppose que les particules de la roche de fond ont été mécaniquement incorporées dans la glace agrégée par accrétion quand la couche de glace a pénétré le lac, à une faible profondeur. Dans une analyse détaillée des valeurs isotopiques, Souchez et al. (2000) ont montré que le fractionnement isotopique qui s'est produit durant l'accrétion n'est que de 60 p. 100 de la valeur théorique. Les

auteurs supposent que la glace agrégée du lac Vostok est un mélange de frasil très peu fractionné (de faible à nul) et d'eau de fractionnement du lac, un phénomène qui a déjà été observé dans la glace située au-dessous des plateformes glaciaires.

Les analyses aux rayons X de la glace agrégée révèlent la très grande qualité du réseau cristallin des énormes monocristaux, même ceux qui contiennent des impuretés (Montagnat et al., soumis). La concentration inférée des défauts est très faible et comparable à celle des monocristaux produits en laboratoire. Cela montre que la glace agrégée n'est pas déformée ou cisaillée, même si elle est située à la base du glacier. D'un autre côté, ces observations appuient l'hypothèse que la glace agrégée est simplement comprimée comme un massif de glace coincé contre la bordure du lac au-dessus duquel se déplace la nappe glaciaire (Lipenkov et Barkov, 1998).

Les informations sur la chaleur géothermique et l'émission mantellique possible de la roche de fond ont été déduites de la teneur en hélium de la glace. L'hélium se diffuse à travers le réseau cristallin de la glace, et sa répartition dans la glace reflète l'équilibre qui existe entre les différentes sources proches (p. ex., l'atmosphère et la roche de fond). La glace agrégée, à Vostok, dont l'hélium ^{4}He provient de la croûte terrestre ou des sédiments, contient deux fois plus de ^{4}He (une fille de la série U) que la glace de la nappe qui la recouvre. En revanche, la teneur en ^{3}He, un isotope habituellement présent dans les sources chaudes et les jaillissements sous-marins ne montre aucun changement important. Cela laisse supposer l'absence de phénomène de forte enthalpie au fond du lac (Jean Baptiste et al., en cours d'impression). Autrement dit, le rift où se situe le lac Vostok est sans doute inactif depuis très longtemps. Cela concorde avec la nature de l'Antarctique de l'Est qui est une ancienne formation cratonique.

La glace agrégée a aussi donné aux biologistes et aux chimistes la possibilité d'étudier les matières provenant du lac sous-glaciaire. Deux récentes études laissent supposer la présence d'une concentration de bactéries allant de faible à élevée, dans la glace agrégée (Priscu et al, 1999, Karl et al, 1999). Les analyses par amplification de la polymérase montrent que certaines de ces bactéries sont très semblables à celles qui ont été observées dans la glace de glacier à différentes profondeurs (Abysov et al, 1998), ce qui appuie l'hypothèse de leur transfert entre la surface et le lac à travers la couche de glace. Cependant, comme il n'existe pas de technique de forage stérile, les microbes que renferme la glace agrégée pourraient être des contaminants, même si on a traité la partie interne de la carotte de glace avec soin. Plusieurs tests laissent supposer qu'on a surestimé la teneur en produits chimiques, p. ex., le carbone organique total (d'au moins un ordre de grandeur), et que la teneur en ammoniac des nitrates et des nitrites est aussi trop élevée (Petit et al., non publié). Ces doutes à propos des résultats de recherches antérieures n'excluent pas la possibilité que le lac Vostok contienne des microorganismes et, de toute évidence, d'autres études sont nécessaires tout comme l'adoption de procédés de décontamination rigoureux et de mesures de contrôle semblables à ceux prévus pour les échantillons de matières extraterrestres. En ce qui concerne la glace du lac Vostok, des mesures chimiques à chaque étape de la décontamination de la glace et du traitement des échantillons pourraient rendre les résultats des analyses biologiques plus crédibles.

Les sédiments marins ont montré qu'il y a eu une période de climat chaud (appelée stade 11) d'une durée inhabituelle comparativement aux autres périodes interglaciaires. On pourrait situer cette période à il y a environ 450 000 ans : le forçage solaire était plus faible qu'au cours de la

période suivante, et nous ne savons pas pourquoi le climat a changé. La question cruciale qui se pose est quel rôle ont joué dans le réchauffement climatique les gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère? C'est là un point intéressant, car on peut considérer le stade 11 comme un analogue pour notre futur, puisque la position orbitale de la Terre suivra une configuration semblable dans un proche avenir.

La carotte de glace de Vostok fournit de l'information sur la couche de glace la plus profonde pour la plus longue période parce qu'elle a été prélevée dans un environnement glaciologique à une profondeur de 3 750 m. Par ailleurs, Vostok n'est par sur un dôme, mais à 300 km en aval de la crête B, qui présente un taux d'accumulation plus élevé que la région de Vostok. Comme la glace profonde provient de la crête B, elle compense beaucoup l'amincissement de la couche de glace. La partie profonde de la carotte a fourni des indices sur le climat avec une très grande résolution (1 000 années par mètre à une profondeur de 3 300 m). On pourrait peut-être extrapoler les indices climatiques d'une carotte de glace formée il y a plus de 400 000 années, en sélectionnant un nouveau site dans la région de Vostok où l'épaisseur de la glace est supérieure à 3 750 m. Un tel site existe dans la partie nord du lac Vostok, là où l'épaisseur de la glace atteint 4 100 m.

Deux projets de forage en profondeur, soit EPICA (Projet européen de forage dans l'Antarctique) et le projet du Japon au Dôme F, sont réalisés sur des dômes de glace distincts. Les sites de forage ont été choisis parce qu'il y est plus facile d'établir la chronologie de la glace, mais la glace profonde rétrécit rapidement au-dessous de 2 000 mètres. C'est pourquoi un nouveau projet de carottage de la glace dans le nord de la région du lac Vostok pourrait apporter un complément utile aux études réalisées au dômes. L'environnement glaciologique, à cet endroit, pourrait être unique comparativement aux autres calottes de glace polaire : il pourrait fournir de l'information sur l'atmosphère pour une très longue période et la plus haute résolution pour la glace formée il y a plus de 200 000 années.

Il faut savoir que dans la partie nord du lac Vostok où la glace est la plus épaisse, la nappe glaciaire fond, alors que l'eau du lac gèle contre la couche de glace dans la partie sud (p. ex., carotte de Vostok). La zone du lac où la glace fond présente un certain intérêt pour les études biologiques parce qu'il s'y trouve des gaz et des sels minéraux provenant des aérosols, et ceux-ci pourraient être importants pour le maintien de l'activité biologique dans le lac ou dans les sédiments proches.

D'un point de vue scientifique, la partie du nord du lac Vostok semble très intéressante pour au moins deux raisons : la possibilité d'obtenir de l'information sur le climat à partir de la carotte de glace et l'exploration in situ du lac à partir d'un trou d'accès. Au plan technique, on ne sait pas encore s'il faut poursuivre les deux voies séparément ou s'il y a lieu d'en combiner les technologies ou les éléments logistiques.

Physiographie des lacs sous-glaciaires de l'Antarctique

Martin J. Siegert
Bristol Glaciology Centre, School of Geographical Sciences, University of Bristol, Bristol BS8 1SS, R.-U.

Il ne fait pratiquement pas de doute qu'il existe des lacs sous l'inlandsis antarctique (Siegert, 2000). Des lacs sous-glaciaires ont été détectés pour la première fois sur les enregistrements de radiosondage (RS) aéroportés à 60 MHz montrant de vastes aires de retours d'écho de sonde lisses et puissants du lit glaciaire, sous plusieurs milliers de mètres de glace (Oswald et Robin, 1973; Siegert et al., 1996). Ces aires sont des réflecteurs spéculaires ou semblables à des miroirs, dont le niveau de l'écho se situe à 10-20 dB au-dessus des valeurs habituellement trouvées pour des interfaces glace-roche. De tels réflecteurs sont caractéristiques des surfaces d'eau. La coïncidence spatiale des régions plates à la surface de la glace exhibant des retours d'écho radio spéculaires du lit de la nappe glaciaire a été observée dans plusieurs régions de l'Antarctique (Siegert et Ridley, 1998a, 1998b). Cela implique que la détermination altimétrique radar par satellite des aires plates à la surface de la glace peut être utilisée pour induire la présence de masses d'eau sous-glaciaires. Des recherches sismiques ont permis de détecter un réflecteur de lit de lac à environ 510 mètres en dessous de la surface sous-glaciaire du lac Vostok, dans l'Antarctique de l'Est (Kapitsa et al., 1996). Plus récemment, Gorman et Siegert (1999) ont montré, à partir de retours d'écho radio capables de pénétrer un réflecteur de fond de lac peu profond sur plusieurs marges de lacs sous-glaciaires, que les lacs sont bien des masses d'eau douce et non pas de simples aires très plates de sédiments de base saturés.

Plus de 70 lacs sous-glaciaires ont été détectés sous l'inlandsis antarctique de 13 millions de km^2 (Figure 1). Presque 60 p. 100 d'entre eux ont été trouvés à moins de 200 km d'une ligne de partage glaciaire, et il faut se rappeler que l'écoulement de la glace de la crête à la marge côtière s'étend souvent sur plus de 1 000 km de long. À peine environ 15 p. 100 des lacs sous-glaciaires sont situés à plus de 500 km d'une ligne de partage des glaces. Le volume total d'eau contenue dans des lacs sous la calotte glaciaire antarctique pourrait varier entre 4 000 et 12 000 km^3 (Dowdeswell et Siegert, 1999).

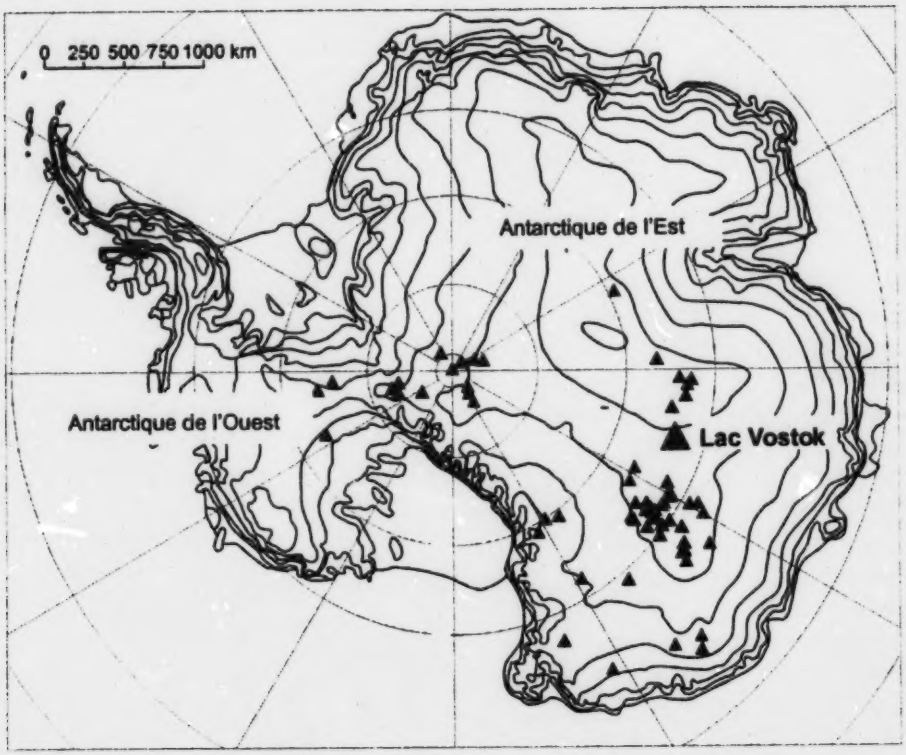

Figure 1 : Emplacement des lacs sous-glaciaires antarctiques (d'après Siegert et al. 1996).

La topographie du lit rocheux, à l'intérieur de la nappe glaciaire, se caractérise par de très grands bassins sous-glaciaires séparés par des chaînes montagneuses. Plus de 60 p. 100 des enregistrements de lac montrent des élévations du lit rocheux local de <400m adjacentes à leurs marges et des gradients de lit de moins de 0,1, ce qui laisse supposer que plusieurs lacs sous-glaciaires se trouvent dans des régions de relief de lit peu élevé. Plus de 40 p. 100 des lacs sous-glaciaires sont situés autour du Dôme C, et plus de 80 p.100 de ces derniers se trouvent dans une topographie de lit rocheux relativement arrondie, à l'intérieur de grands bassins sous-glaciaires. Le lac Vostok, près de la crête B, semble être situé dans un bassin topographique aux pentes relativement basses à l'est et de terrain plus abrupt à l'ouest (Kaptisa et al., 1996; Siegert et al., 2000).

Plusieurs lacs se trouvent à l'intérieur et sur les marges de bassins sous-glaciaires. Il y a d'abord ceux qui se situent là où la topographie est relativement arrondie, souvent proches du centre des bassins sous-glaciaires. Deuxièmement, quelques lacs apparaissent dans des dépressions topographiques importantes, souvent proches des marges des bassins sous-glaciaires, mais assez près du centre d'écoulement lent de la nappe glaciaire antarctique. On trouve aussi des lacs sur les flancs de montagnes sous-glaciaires, principalement à l'intérieur de la nappe glaciaire.

Figure 2 : Direction de l'écoulement de la nappe glaciaire et emplacement des lacs sous-glaciaires connus (identifiés par une étoile) autour a) de la moitié est de la calotte glaciaire antarctique pour laquelle nous avons des données de radar aéroporté et b) sur l'ensemble du continent antarctique

La répartition des lacs sous-glaciaires antarctiques montre aussi que seize d'entre eux sont situés près de la marge de transition vers la zone d'écoulement accentué (Siegert et Bamber, 2000; figure 2). Plusieurs lacs sous-glaciaires que l'on présumait être dans la région centrale d'écoulement lent de la glace se trouvent de fait en bordure de la zone d'écoulement accentué. Les lacs sous-glaciaires près du pôle Sud sont adjacents à un système de glaciers émissaires profondément encastrés dans le continent antarctique, qui se déplace dans la plateforme de glace flottante Filchner-Ronne. Cela indique qu'un écoulement de glace à base tempérée (glissement basal et(ou) déformation de sédiments sous-glaciaires) peut être amorcé près du cœur de la nappe de glace et s'étendre sans interruption entre cette région et la marge de la nappe glaciaire où s'arrête le courant glaciaire. À moins que la base de la nappe glaciaire ne gèle en aval de ces lacs, ce qui est peu probable étant donné l'accélération continue de l'écoulement de la glace calculée pour ces caractéristiques d'écoulement, il devrait exister une relation hydrologique sous-glaciaire entre les régions où s'amorce l'écoulement accentué, dans lesquelles se trouvent les lacs, et les courants glaciaires, plus bas, en aval. Il en découle que plusieurs des caractéristiques de l'écoulement accentué qui débute à l'intérieur de la nappe

glaciaire antarctique pourraient indiquer l'existence d'une base tempérée sur toute la longueur de la formation. La détermination des décharges de la nappe glaciaire à base tempérée est une valeur importante comme condition aux limites que doivent utiliser ceux et celles qui élaborent des modèles numériques de l'inlandsis antarctique, puisque le régime thermique sous-glaciaire est essentiel à l'écoulement de la glace.

2.2 Activités canadiennes

La vie dans le Lac Vostok

David Bird
Département des sciences biologiques, Université du Québec à Montréal

L'observation de l'extérieur du système du lac Vostok sous-glaciaire, compte tenu du peu de connaissance des conditions qui y prévalent, porte à se demander si la vie pouvait y exister et quelles caractéristiques pourraient posséder les communautés d'organismes vivants, si elles ont survécu. L'isolement ininterrompu de >1 000 000 d'années du lac Vostok de la biosphère en surface et des importantes sources d'énergie doit avoir rendu la vie très difficile. En effet, les conditions physiques du lac se distinguent par des températures au-dessous de zéro, une pression hydrostatique élevée, une dilution du substrat qui pourrait être rapide à cause de la dynamique de mélange des eaux et un faible taux de renouvellement de l'eau (et des nutriments). On peut se demander aussi comment le lac Vostok et d'autres lacs sous-glaciaires ont été colonisés et comment les caractéristiques génétiques des communautés éventuellement présentes ont été déterminées par la source de bactéries colonisatrices et par les changements subséquents, vu l'isolement du reste la biosphère?

La première des contraintes physiques est la température de l'eau. La température de l'eau que l'on croit être d'environ –2,7 °C (p. ex., Carmack et Wüest, 2000). Les températures au-dessous de zéro n'empêchent pas la vie, en autant qu'il existe de l'eau liquide. Les bactéries actives ont été trouvées dans des environnements plus froids à la surface de la planète, notamment dans les lacs des vallées sèches antarctiques qui contiennent de l'eau salée à -8 °C (Tyler et al. 1998) et dans les capillaires de migration de la saumure dans la glace de mer à des températures similaires (Junge et al., en cours d'impression). Les bactéries psychrotrophes se développent dans des cultures à des températures pouvant atteindre jusqu'à –12 °C. Le record est détenu par un eucaryote photosynthétique spécialement adapté à la croissance sur la neige, le *chlamydomonas nivalis*. Ses températures de croissance minimale, optimale et maximale sont de –36 °C, 0 °C et 2 °C.

Toutefois, des preuves solides indiquent une relation négative entre les basses températures et les conditions oligotrophes. La croissance bactérienne à très basse température peut être inhibée de façon disproportionnée pour de très faibles concentrations en nutriments (Pomeroy et Wiebe, 2001). Les bactéries semblent devoir disposer de nutriments concentrés pour pouvoir croître à des températures proches du point de congélation, apparemment à cause d'une affinité réduite (c'est-à-dire une capacité réduite d'absorber des molécules organiques en concentrations diluées). Cependant, on ne sait pas si cet effet empêche la croissance ou la freine.

La deuxième contrainte physique qui doit être prise en considération est la pression hydrostatique élevée. À environ 4 km de profondeur sous la glace et jusqu'à un maximum de 5 km, la pression dans le lac serait de l'ordre de 350 à 450 bars, ce qui inhiberait la croissance de

la plupart des bactéries de surface. Les bactéries des grands fonds marins comprennent les espèces barotolérantes, qui sont inhibées mais capables de survivre à de telles pressions, et les espèces barophiles qui ont besoin et profitent de ces pressions très élevées. À ma connaissance, il n'existe pas d'environnements en eau douce qui exhibent des pressions similaires. En surface, le lac Baikal est le plus profond avec ses 1 637 m. Par conséquent, ces pressions pourraient constituer un problème pour les bactéries du lac Vostok, sauf si elles provenaient d'un habitat de pression élevée équivalente (tel que l'hydrosphère en formations géologiques profondes).

La dynamique écologique des communautés microbiennes du lac Vostok dépendra beaucoup des équilibres énergétiques physiques qui assurent la circulation dans le lac. L'existence des communautés biologiques repose sans doute entièrement sur les apports organiques en carbone, azote, phosphore et oxygène et d'autres substrats provenant du déplacement lent de la glace d'un bout à l'autre du lac. Ce mouvement est estimé à 2,2 mètres par an, soit environ 6 mm par jour. Des vitesses de circulation élevées (Carmack et Wüest, 2000) seraient nuisibles pour les communautés microbiennes qui pourraient croître à l'interface glace-eau, à cause de la dilution des nutriments transportés. Il est possible que l'échantillon microbien prélevé dans la glace agrégée ne soit pas représentatif de l'ensemble de l'eau du lac et qu'il provienne des bactéries vivant à l'interface glace-eau.

Pour conclure, il ne faudrait pas négliger le manque de lumière solaire. Il a été démontré que la lumière solaire n'est pas uniquement nécessaire à la production photosynthétique du carbone organique labile dans les eaux de surface, mais qu'elle constitue un facteur déterminant de la décomposition de la matière organique et du métabolisme microbien qui en découle dans les systèmes naturels. Les composés réfractaires amenés dans le lac par la glace de glacier, soit de la surface ou par l'érosion du « bassin de drainage », pourraient demeurer réfractaires et inaccessibles à cause de l'absence de dégradation photolytique.

À quoi ressemblerait la communauté du lac Vostok? Un isolement d'un million d'années excluant tout échange d'espèces et de gènes avec la biosphère environnante est très long d'un point de vue humain, mais relativement court au plan évolutif. Deux groupes d'organismes vivants purement microbiens (bactéries et archéobactéries) existent depuis plus de trois milliards d'années, ce qui rend l'échelle de temps exprimé en millions d'années presque relative en ce qui concerne cette période. Tiedje (1999) souligne que même les espèces bactériennes très apparentées vivant dans l'habitat chaud et riche que forme le tube digestif des mammifères auraient divergé sur une période de 10 à 100 millions d'années. Il y a de bonnes chances que les bactéries du lac Vostok soient mieux adaptées au froid, à l'absence de lumière et aux conditions déficientes en nutriments, mais uniquement au plan génétique et peut-être pas au niveau de l'espèce.

Une possibilité plus intéressante est que les conditions ambiantes extrêmes dans le lac Vostok pourraient avoir pour effet de sélectionner, d'isoler et de permettre la dominance de types de bactéries habituellement rares et difficiles ou impossibles à cultiver à partir des communautés de surface. Nous pensons que les résultats de nos mises en culture d'organismes provenant de la glace du lac Vostok donnent une idée très partielle de la nature de cette communauté (Karl et al., 1999). La presque totalité de l'acétate marqué au ^{14}C ajouté à la glace fondue a été respiré et moins de 0,1 p. 100 a été incorporé dans les protéines comme mesure de la croissance. Cela laisse supposer l'existence d'une communauté exclusivement axée sur sa survie et sa réparation en présence de nouveaux substrats.

Projet d'échantillonnage d'un lac sous-glaciaire du pôle Sud

Erik Blake
Icefield Instruments Inc.

J'ai travaillé en collaboration avec David Fisher, de la CGC, sur une technologie de forage propre utilisant un carottier SIMON modifié. Cet outil a été conçu pour prélever des échantillons de métaux en trace sans contamination excessive à la surface des carottes de glace, de manière à réduire les matières à extraire et à obtenir de bons échantillons d'analyse. Il s'agissait principalement de changer les matériaux et le mode de manipulation du carottier. Les parties en acier et en aluminium inoxydables du carottier qui entrent en contact avec la glace ont été reconstruites en titane virtuellement pur et en polyéthylène haute densité, alors que les forets en acier ont été remplacés par des forets en carbure de tungstène et liant au cobalt. La tête de coupe a aussi été recouverte d'un revêtement de nitrite de titane. Le carottier a été testé sur le terrain au cours de l'été 2000, et des carottes de 60 mètres ont été extraites. Quelques-unes des premières analyses ont permis de détecter 200 ppm de métaux sur la surface des carottes. Je suppose ici que nous utilisions encore des taquets en acier, et non pas en carbure. Les niveaux réels devraient être d'un plus petit ordre de grandeur. L'aspect le plus innovateur du carottier modifié est que la carotte pénètre dans un manchon de polyéthylène prénettoyé, qui est ensuite fermé par un bouchon. Ce manchon sert de tube de transport de la carotte.

En plus de travailler avec David Fisher, j'ai présenté avec Buford Price, de l'Université Berkeley de Californie, un projet d'échantillonnage sous-glaciaire du lac situé près du pôle Sud. Notre projet s'inscrivait dans une proposition en quatre volets qui, malheureusement, n'a pas été financée. L'idée poursuivie était de tester la technologie à petite échelle dans un petit lac avant de passer à une plus grande échelle, dans de plus grandes masses d'eau comme le lac Vostok. L'un des avantages que présente ce lac est que l'infrastructure nécessaire au projet est déjà en place, à quelque 8 km du pôle Sud. Au cours de la première année du projet, nous voulions tester et caractériser le lac des points de vue de la profondeur et de l'épaisseur des sédiments, à l'aide de méthodes sismiques. La conception et l'essai du carottier devaient se faire parallèlement à la caractérisation du lac. Il en aurait résulté un « carottier stérile » conçu pour commencer à fonctionner à 10 à 20 mètres au-dessus de l'interface glace-eau.

Trois principales composantes entrent dans la conception du carottier : un système de déploiement qui ne pénètre pas dans le lac, une sonde d'échantillonnage qui, évidemment, entre dans le lac et une couronne de complétion. La longueur totale reste à déterminer, selon les instruments qui seront inclus dans le carottier.

Le système de déploiement est connecté à l'appareillage de surface par un câble à deux fils conducteurs transportant une puissance de 600 VAC (20 kW à la surface) et un lien de communication. Il comprend un ordinateur de commande, un dispositif d'enregistrement des données, un contrôle de puissance et une batterie de secours, un treuil à câble de 120 mètres de long servant à descendre la sonde d'échantillonnage et un fût extérieur de 18 cm.

La sonde d'échantillonnage est constituée d'un ensemble d'instruments et de commandes, d'appareils de prélèvement d'échantillons d'eau et d'un carottier à chute. Le module de commande est doté d'un ordinateur de contrôle et d'une ligne de données, d'une batterie de secours, d'un système d'enregistrement de données d'imagerie sur disque dur et d'un câble enroulé fixé au carottier à chute. Aux ensembles de capteurs, on pourrait ajouter des instruments de mesure de CTP (conductivité, température et profondeur), du pH, du potentiel d'oxydoréduction et du carbone dissous, ainsi que des détecteurs de fluorescence, une caméra

(micro/macro), une pompe de prise d'échantillons en vrac à filtre de 0,2µm et un sonar de profondeur. Les préleveurs d'échantillons d'eau consistent en trois échantillonneurs (avec évents) étanches à l'oxygène et télécommandés, qui pourraient être des préleveurs modifiés Niskin ou à sacs, plus un appareil de prélèvement d'échantillons sous pression pour la conservation des gaz dissous et un petit appareil de prise d'échantillons de contamination croisée, qui serait déclenché avant que la couronne de forage n'entre dans le lac. Le carottier à chute devait être équipé de doigts à ressort, d'un clapet de retenue et(ou) d'un dispositif de carottage par piston pour tenir la carotte en place. Le dispositif de carottage n'est pas sous pression, ce qui risque de poser un problème parce que les gaz dissous dans les sédiments pourraient perturber les couches des carottes, à la remontée du carottier à la surface.

Le déploiement de la couronne de complétion s'effectue selon une procédure à six étapes. La première consiste à utiliser un système conventionnel de forage à injection d'eau chaude pour percer un trou d'accès jusqu'à un point proche de l'interface glace-eau. Le système à eau chaude sert à réduire la contamination, et il faut s'assurer de forer en sous-pression pour éliminer tout risque d'hydrofracture (p. ex., utiliser des pompes de puits profond au niveau de 350 mètres).

La deuxième étape consiste à geler le carottier dans le trou. La question importante qui se pose à ce stade est la stérilisation. La couronne de forage doit être stérilisée à l'usine de fabrication et expédiée vers le site dans un emballage stérile. Une fois le carottier en place, l'eau est extraite pour accélérer la fermeture du trou de forage. Pour la dernière stérilisation sur le site, on peut utiliser du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), bien que quelques bactéries peuvent y survivre. L'utilisation d'alcool est une option, mais l'apport de carbone organique peut perturber les échantillons. C'est à cette étape que l'échantillon de contamination croisée est pris en vue de fournir une indication de ce qui se trouvait autour de la couronne de forage avant qu'elle n'entre dans le lac.

La troisième étape correspond au processus de déploiement, qui comprend la libération de la couronne de complétion. La couronne est un point chaud de 10 kW, et sa vitesse de pénétration est de 5,5 cm/minute. L'aspect à surveiller ici est ce qu'il advient de l'eau provenant de la fonte de la glace causée par la couronne de forage. Il faut donc mettre au point une méthode d'amenée de l'eau en surface. Un sonar placé dans la couronne de complétion détecte l'interface glace-eau, et lorsqu'elle entre dans l'eau, la couronne s'enfonce jusqu'au fond du lac ou flotte latéralement.

La quatrième étape consiste à exécuter le plan d'échantillonnage et à remonter les échantillons. La sonde d'échantillonnage est descendue à l'aide du treuil, dans une descente contrôlée qui permet de prendre des échantillons d'eau, des échantillons par filtre et d'autres mesures. Une fois cette opération terminée, le câble de retenue de la sonde est libéré et la sonde tombe au fond pour prendre un échantillon. Le treuil remonte la sonde d'échantillonnage dans le système de déploiement. Un mécanisme de dégagement doit être installé au cas où le tube de carottage serait pris dans les sédiments.

La cinquième étape est l'obturation du trou. L'opération est difficile à mener au plan technique parce que, idéalement, il faudrait un blocage par air. Notre meilleure idée jusqu'ici est d'utiliser un système de réfrigération, peut-être des refroidisseurs thermoélectriques installés dans le fût extérieur pour produire un bulbe gelé à la partie inférieure (pompe à chaleur), ou encore un packer ou un autre dispositif d'obturation du trou.

La dernière étape pose un défi technique, puisqu'il s'agit de récupérer la couronne et les échantillons. Le système de forage à eau chaude rouvre le trou pour l'appareil de prise

d'échantillons en forant le long du câble. Le fût du système de déploiement peut être laissé en place. Pour éviter que les tuyaux d'eau chaude s'emmêlent avec le câble de forage, des patins anticouple pourraient être placés à intervalles réguliers le long des tuyaux.

Les principaux obstacles à surmonter dans le processus de déploiement sont la stérilisation et le nettoyage de la couronne de forage, le percement d'un trou d'accès à travers 3 km de glace ou plus, la réobturation du trou après avoir terminé le programme d'échantillonnage et le forage le long du câble pour récupérer l'échantillon. D'autres questions doivent être abordées, notamment la méthode de manipulation des échantillons à la surface, tout particulièrement ceux qui sont dans des contenants étanches à l'environnement sous une pression de 300 bars.

Le lac Vostok, table rase et défi multidisciplinaire

Garry K. C. Clarke
Sciences de la terre et des océans, Université de la Colombie-Britannique
Vancouver (C.-B.) V6T 1Z4

Bien que les lois de la physique s'appliquent de façon universelle, l'importance relative des processus qui se déroulent dans des systèmes exotiques et de ceux qui s'opèrent dans des systèmes familiers, peut différer considérablement. Il est donc nécessaire d'adopter une approche prudente pour l'interprétation de la façon dont se comportent les systèmes exotiques tels que le lac sous-glaciaire Vostok. Ce qui fait du lac Vostok un système exotique, nonobstant son inaccessibilité, est la manière selon laquelle les éléments géophysiques conventionnels interagissent pour contrôler la géométrie du lac et les transferts de masse et d'énergie vers l'intérieur et vers l'extérieur du lac. Il est peu probable qu'on puisse comprendre les aspects fondamentaux touchant la géométrie du lac, la dynamique des fluides, l'équilibre chimique et le bilan hydrologique, ainsi que les processus de fusion et d'accrétion en examinant séparément le lac, la nappe glaciaire et la lithosphère. J'illustrerai cet imbroglio en prenant pour exemple une curieuse caractéristique de la carotte du lac Vostok, que je décrirai sous divers points de vue et dont j'examinerai toutes les conséquences possibles.

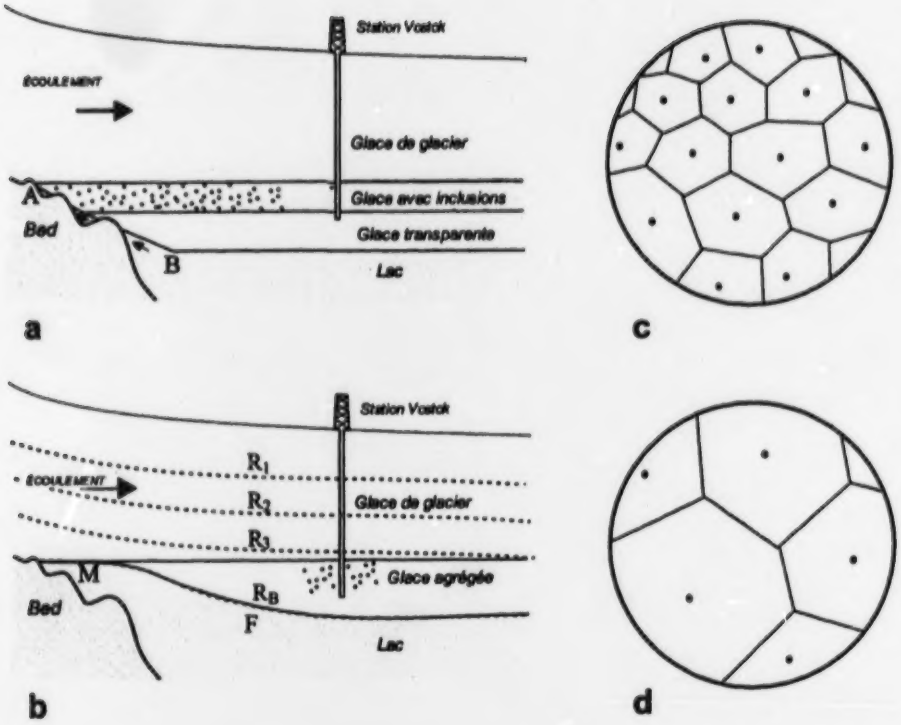

Fig.1. (a) Schéma simplifié du lac Vostok et de son environnement (d'après Jouzel et al., 1999). (b) Schéma simplifié des horizons de réflexion radar (R1, R2, R3 et RB) aux alentours du lac Vostok et leur interprétation en rapport avec les zones de fonte (F) et de gel (G) à la base (d'après Siegert et al., 2000). (c) Petits cristaux de glace avec inclusions minérales servant de centres de nucléation et de croissance des cristaux. (d) Grands cristaux de glace avec inclusions minérales servant de centres de nucléation et de croissance des cristaux.

Jouzel *et al.* (1999) et Souchez *et al.* (2000) font observer que les 70 mètres du dessus de la couche de glace lacustre, dans la carotte du lac Vostok, contiennent des inclusions minérales de l'ordre du millimètre, « plus nombreuses dans la partie supérieure de la glace lacustre » et qui « semblent absentes en dessous de 3 609 m » (le carottage a été arrêté à 3 623 m). Leur interprétation du mécanisme d'entraînement des inclusions est résumée dans la Figure 1a. Essentiellement, la région près du point B est considérée comme celle où se produit l'accrétion de la glace et où les inclusions solides provenant du lit du glacier sont fixées à la semelle du glacier. Cette interprétation est corroborée par le modèle de circulation du lac Vostok de Wüest et Carmack (2000) et s'appuie principalement sur les processus physiques qui se déroulent sous les plateformes de glace flottante. Les cellules convectives s'élèvent au point le plus haut de la voûte de glace, et l'eau qui monte est sujette à une surfusion constitutionnelle qui mène à la formation de frasil dans la colonne d'eau montante. Énoncée de cette façon, l'interprétation plausible de la présence d'inclusions solides peut être qualifiée de « teintée d'océanographie ».

Une interprétation teintée de glaciologie pourrait avoir ses sources dans l'analyse de Siegert *et al.* (2000) de l'espacement entre les horizons de réflexion radar (nommés R1, R2, R3 et RB dans la Figure 1b). Les variations de l'épaisseur de la couche entre les horizons R3 et RB sont vues comme la preuve qu'il se produit bien une fusion ou une accrétion au contact de la glace et de l'eau. L'interprétation des données de radar montre que la marge en amont du lac (en ce qui concerne l'écoulement de la glace) est une région de fusion (F dans la Fig. 1b), plutôt que de congélation (A dans la Fig. 1a), qui ne devrait donc pas favoriser l'entraînement d'inclusions solides. Du point de vue de la mécanique d'écoulement de la glace, les marges amont et aval du lac seraient des régions de concentration des forces de cisaillement (Blatter *et al.*, 1998, Figures 4 et 5) dans lesquelles les déformations thermiques pourraient être significatives. Dans ces conditions, la fusion, plutôt que la congélation, devrait prévaloir. Une autre observation plus tentante est que pour la plus grande partie de la section de glace lacustre de la carotte du lac Vostok, il existe une correspondance en ordre de grandeur entre la densité en nombre d'inclusions n_s (nombre d'inclusions par unité de volume) et la densité en nombre de cristaux de glace n_x (nombre de cristaux de glace par unité de volume). Cela pourrait être une coïncidence, mais on peut y voir aussi la preuve que les inclusions solides servent de germes de croissance aux cristaux de glace (Fig. 1c-d). Quoique très peu probable, cette nucléation pourrait indiquer l'existence de processus physiques inattendus qui devraient idéalement être examinés par des travaux en laboratoire et par la modélisation informatique.

Le fait que les interprétations océanographiques et glaciologiques ne mènent pas à une compréhension cohérente des processus importants qui s'opèrent dans le lac souligne la nécessité d'adopter une approche intégrée, qui ne sépare pas la mécanique des nappes glaciaires, l'hydrologie sous-glaciaire, la dynamique des lacs et les processus de fusion et de congélation entre le lac et la nappe glaciaire. Il existe une pléthore de problèmes scientifiques dont plusieurs pourraient être abordés sans grandes dépenses au plan financier et sans mettre les pieds dans l'Antarctique. Le Canada pourrait contribuer beaucoup à l'avancement des sciences appliquées au lac Vostok en exploitant les points forts de la modélisation informatique et en augmentant son investissement dans les champs pertinents d'études sur le terrain et en laboratoire des processus glaciologiques.

Analyse des carottes de glace de l'Arctique canadien et du Yukon

David A. Fisher et Roy (Fritz) Koerner
Programme national de glaciologie, Division de la science des terrains, CGC, RNCan

En plus de MM. Fisher et Koerner, le groupe de la glaciologie est formé de Mike Demuth, Jocelyne Bourgeois, Chris Zdanowicz, James Zheng, John Sekerka et Murty Parnandi. Le programme de carottage a été mis sur pied dans les années 1970. Il fournit de l'information sur l'histoire du climat à long terme, la chimie atmosphérique, les isotopes stables, le pollen, la biologie et d'autres informations avec des résolutions temporelles allant des saisons jusqu'aux millénaires. Cette information couvre le dernier cycle glaciaire-interglaciaire à des sites choisis sur l'ensemble de l'Arctique et du Yukon. Les études des carottes de glace ajoutent une dimension temporelle aux programmes régionaux de surveillance du groupe et mettent les tendances modernes en contexte. L'approche multi-substitutive et multi-variables appliquée aux carottes de glace permet d'établir des relations de cause à effet et de fournir, avec les données d'examen des anneaux de croissance des arbres et d'autres strates sensibles au climat,

le moyen de retracer dans le détail l'histoire climatique de la terre au cours des quelques derniers milliers d'années.

Les études des carottes de glace prévues pour le Mt Logan et ses environs permettront de déterminer l'importance du Nord-ouest du Pacifique et le contraste entre l'Ouest et l'Est de l'Arctique. L'étude du Mt Logan est dirigée par la CGC, mais elle a été rendue possible grâce à l'approche coopérative adoptée pour la planification, le financement et la réalisation entre les universités et des organismes gouvernementaux (Université du New Hampshire, Université du Maine, Université d'Ottawa, Université de Copenhague, MPO, Université de l'Alaska, Université de l'Alberta, IAAN, UC-B., NIPR - Japon, Science Centre Kluane, Parcs Canada, etc.).

Les travaux sur les carottes de glace de l'Arctique ont récemment porté sur notre nouveau carottier ultrapropre, qui extrait des carottes très propres servant à l'analyse de métaux ultratraces et d'autres « contaminants ». Compte tenu du développement rapide des méthodes analytiques et des techniques de carottage, il est important d'obtenir des carottes de glace ultrapropres pour ces études ultratraces (métaux, ions, paramètres biologiques, etc.). Jusqu'à présent, la plupart des laboratoires d'analyse des métaux en traces ont adopté des méthodes de décontamination des carottes de glace. Bien qu'efficaces et largement utilisées, ces méthodes font une consommation massive de carottes et prennent beaucoup de temps. Souvent, une carotte peut entièrement servir à l'analyse de métaux en traces, sans rien laisser qui puisse servir d'échantillon pour d'autres études. De plus, il est difficile de contrôler et d'enlever les contaminants pénétrants quand on manipule les sections bulleuses des carottes de glace. L'un de nos buts était de réduire considérablement la contamination durant le carottage, la manipulation et l'expédition. La sonde de carottage propre est semblable aux sondes en acier qui étaient utilisées auparavant. Il s'agit d'un carottier SIMON modifié (Division des sciences des terrains, CGC) dans lequel l'acier des fûts est remplacé par du titane et le diamètre des tubes a été agrandi pour accepter des manchons de plastique. D'autres modifications majeures ont été faites, notamment à la couronne de forage, aux trépans, au guide d'éclats, aux fûts internes et externes et au mécanisme de chargement des carottes. Les modifications ont été apportées par la société Icefield Instruments Inc., de Whitehorse. Le carottier est léger, compact, facile à exploiter et servira à des projets communs nécessitant des échantillons ultrapropres et pour lesquels la planification et le financement conjoints seront possibles. Nous analysons aussi deux carottes de la surface au lit récemment prélevées dans la calotte glaciaire Devon. Les futurs sites possibles de carottage dans l'Arctique au stade de la reconnaissance et de la planification sont la calotte glaciaire Barnes (île de Baffin) et le Mt Oxford (île Ellesmere). Ces projets sont actuellement aux étapes de la planification en groupe, de la planification scientifique et du financement. Tous ceux et celles que cela intéresse sont invités à communiquer avec nous.

La troisième des plus grandes calottes glaciaires connues, après les inlandsis de l'Antarctique et du Groenland, est la calotte glaciaire Nord de la planète Mars. Le groupe mène un actif, quoique petit, programme d'études de cette calotte martienne. L'objectif est de faire la lumière sur les cycles climatiques de Mars, la rhéologie des formations glacielles extrêmes et le cycle de l'eau (ressource) sur Mars. Les deux premières conférences internationales sur la science polaire et l'exploration de la planète Mars ont été organisées et parrainées par la CGC en collaboration avec la NASA, l'IGS et l'Université d'Islande. L'entreprise Icefield Instruments Inc. a participé aux travaux, et nous contribuons aussi à ses recherches sur les cryorobots devant servir à explorer les lacs antarctiques et Europe.

Une collaboration récente entre Dave Fisher et Martin Siegert, du Centre de glaciologie de Bristol, a porté sur de la glace ancienne à la surface de l'Antarctique et la création d'enregistrements de données climatiques détaillées sur la Terre et la planète Mars. L'écoulement de la partie est de l'inlandsis antarctique à travers la barrière sous-glaciaire des avant-monts des montagnes transantarctiques, allié à la sublimation de la glace de surface, expose la glace ancienne à la surface de la nappe glaciaire. Des météorites et des poussières qui se retrouvent à la surface de zones de « glace bleue », à cause de l'ablation superficielle de longue durée causée par les vents catabatiques. Des couches internes isochrones mesurées par radar aéroporté ont été repérées dans deux zones de glace bleue sur >2 000 km de l'inlandsis au site de prélèvement de carottes du lac Vostok. Il a été possible d'établir une relation entre la profondeur et l'âge des zones de glace bleue, ce qui a révélé que l'une d'elles constituait un site de choix pour l'enregistrement de données sur les paléoclimats à haute résolution portant sur les 100 000 dernières années. La structure de la subsurface de l'inlandsis à travers cette zone de glace bleue est analogue à celle proposée pour les bandes claires et sombres sur la calotte glaciaire Nord de la planète Mars, et elle laisse supposer que des indices détaillés sur les paléoclimats et sur les poussières et les météorites anciennes pourraient être obtenus à la surface de la glace martienne.

Genèse et croissance modelée de l'inlandsis antarctique
Examen de modèle imbriqué du bilan énergétique sous-glaciaire de la région du lac Vostok

Shawn J. Marshall
Département de géographie, Université de Calgary

Mon principal domaine de recherche est la modélisation théorique de la dynamique des glaciers et des nappes glaciaires. J'ai consacré plusieurs années à la création d'un modèle numérique tridimensionnel de la thermodynamique des nappes glaciaires. Les études faites à l'aide de ce modèle ont porté jusqu'ici sur les nappes glaciaires Laurentide et du Groenland. En collaboration avec Garry Clarke (Université de la Colombie-Britannique) et Kurt Cuffey (Université Berkeley de Californie), de récentes études ont été conduites sur la création de nappes de glace, les cycles glaciaires de l'ère glaciaire, la dynamique des courants glaciaires, les reconstitutions des nappes glaciaires éemiennes au Groenland et la déformation de la glace profonde dans des carottes de glace du Groenland. Je n'ai pas encore mené d'études dans l'Antarctique, mais il devrait être relativement simple et utile d'appliquer le modèle à la région de l'Antarctique de l'Est.

Une hiérarchie spatio-temporelle de modélisation est nécessaire pour étudier l'évolution des lacs sous-glaciaires. Des études à long terme de la genèse et de la croissance de l'inlandsis antarctique peuvent être effectuées à un pouvoir de résolution relativement faible (env. 100 km) à l'aide d'un modèle tridimensionnel. Un examen exhaustif de la croissance de l'inlandsis antarctique au cours de l'éocène et de l'oligocène étant presque à la portée des ordinateurs de grande puissance, je me prépare à mener cet examen avec Andy Bush, Sciences de la terre et de l'atmosphère, Université de l'Alberta. Andy Bush est un modélisateur des paléoclimats qui a adapté le modèle GFDL-Princeton de circulation générale du système couplé océan-atmosphère à des fins d'applications dans le temps « très ancien ». Ce modèle à grande échelle nous permettra d'examiner des questions concernant l'origine et l'âge des lacs sous-glaciaires sous l'inlandsis antarctique Est. Il est possible que quelques lacs aient été emprisonnés et gelés sous la glace en mouvement ou en nucléation. De tels lacs sous-glaciaires auraient probablement

gelé complètement aux premiers stades d'évolution de l'inlandsis. Comme l'inlandsis a épaissi et s'est établi en permanence dans l'Antarctique de l'Est, les températures à la base ont dû atteindre le point de fusion, et l'eau de fonte à la base aurait alors commencé à s'accumuler dans des bassins sous-glaciaires. Le moment de la formation de lacs sous-glaciaires dans les différentes régions serait dicté par la thermodynamique tridimensionnelle de la calotte glaciaire (advection, diffusion et déformation thermique de la glace), les variations de la température de l'air et des précipitations, et le flux de chaleur géothermique local.

Des études basées sur des modèles imbriqués sont aussi réalisables si on s'intéresse particulièrement aux conditions dynamiques et thermodynamiques au voisinage des lacs sous-glaciaires, notamment dans les régions du lac Vostok ou du pôle Sud. De telles études utiliseraient soit, a) des modèles 3D à haute résolution (env. 2 km) appliqués à la mécanique de cisaillement et de déformation longitudinaux, ou b) des modèles thermodynamiques unidimensionnels à très haute résolution verticale (env. 1 mètre à la base), adaptés pour mener des travaux ponctuels sur le bilan énergétique à la base, en différents endroits. Ces deux approches font appel obligatoirement à des études 3D à grande échelle pour pouvoir générer les conditions aux limites (champs de vitesse horizontaux, gradients topographiques régionaux) pour la modélisation à haute résolution. On peut faire des études sur modèle imbriqué pour un état stable de l'inlandsis antarctique Est en se basant sur la géométrie moderne ou pour examiner l'histoire récente de la nappe glaciaire, par exemple sur les 400 000 dernières années, avec forçage paléoclimatique, à partir de données provenant de la carotte de glace du lac Vostok. Dans les deux cas, l'objet premier des travaux serait le bilan énergétique aux interfaces lac-glace ou lit-glace afin d'analyser la variabilité temporelle et les profils spatiaux de la glace de base tempérée par rapport à la glace de base froide et des conditions de fusion par rapport au regel. La connaissance approfondie du flux de chaleur géothermique et des flux de chaleur de convection dans le lac serait un préalable essentiel dans les deux cas.

Une étude hiérarchique de ce type peut être faite par étapes, en utilisant d'abord des modèles à grande échelle unidimensionnels conçus spécifiquement pour examiner le problème. Une modélisation tridimensionnelle à haute résolution est concevable, mais des modèles de dynamique de la glace plus élaborés doivent être créés et testés pour le problème en question. Cela s'inscrirait bien dans la chronologie générale de l'exploration des lacs sous-glaciaires, puisque des modèles plus évolués peuvent être conçus et adaptés au problème. Toutefois, comme la mise au point d'une modélisation tridimensionnelle à haute résolution repose sur la production de cartes détaillées du lit rocheux, il faudra peut-être effectuer quelques travaux de caractérisation radar sur le terrain qui serviront à élaborer le modèle régional nécessaire. Pour conclure, des études modélisées pourraient, évidemment, être menées sur les sites d'essai de l'Arctique, compte tenu des données disponibles sur le lit rocheux, dans le but de déterminer l'utilité (ou l'inutilité) des modèles pour aider à comprendre l'histoire et l'environnement des lacs sous-glaciaires.

Il y a des rapports naturels entre les études théoriques sur modèles de l'Antarctique, et du lac Vostok principalement, et les travaux de recherche menés dans le cadre du Programme d'étude de l'évolution du système terrestre de l'Institut canadien des recherches avancées (ICRA). Je viens tout juste d'entamer des travaux coopératifs de l'ICRA sur la reconstitution du paléoclimat et de l'inlandsis antarctique à l'ère tertiaire-quaternaire, en collaboration avec Andy Bush, de l'Université de l'Alberta, et Dan Schrag, de l'Université Harvard. D'autres relations seront établies au sein du réseau du CCRA en vue a), d'exploiter le modèle de circulation de lac d'Eddy Carmack et b), de prendre des contacts directs avec Garry Clarke et

Erik Blake pour l'établissement éventuel d'un laboratoire d'étude des environnements sous-glaciaires où se ferait l'examen en conditions expérimentales contrôlées des processus sous-glaciaires et des données essentielles à la validation des modèles.

Activités de recherche sous-glaciaires et dans les glaces profondes
Wayne Pollard
Département de géographie, Université McGill

Avec mes étudiants (maîtrise et doctorat), je mène trois activités concernant les environnements des lacs sous-glaciaires et des glaces profondes. Mes travaux dans le premier domaine, l'hydrologie du pergélisol, portent sur les sources d'eau pérennes de l'île Axel Heiberg, leur nature hydrologique, leur origine et leur géomorphologie. Dans nos recherches sur les sources de recharge en eau, nous incluons l'eau de fonte sous-glaciaire et les grands lacs de barrages glaciaires comme agents de recharge les plus probables. Au fur et à mesure que nous éluciderons les rapports hydrologiques entre les systèmes sous-glaciaires et les systèmes de sources de l'île Axel Heiberg, nous augmenterons la compréhension des systèmes d'eau souterraine sous-glaciaires (Dale Andersen, Chris Omelon, Lyle White et Chris McKay prendront part aux travaux).

Le deuxième domaine couvre les travaux récents de Derek Mueller sur l'écologie microbienne dans les trous de cryoconite trouvés sur les glaciers Canada et White (Mueller, D. et al., 2001). Bien que cette étude soit restreinte aux écosystèmes de glace de surface, elle permettra de mieux connaître les habitats glaciels. Son contexte bipolaire fournira des données sur les différences marquant la biodiversité des systèmes glaciaires arctiques et antarctiques.

Le troisième et dernier domaine d'étude est l'évaluation du lac Vostok en tant qu'analogue biologique d'Europe. Au cours des trente dernières années, les planétologues ont cherché des analogues terrestres aux processus physiques, biochimiques et biologiques qui pourraient avoir lieu sur Mars et Europe. Récemment, le lac Vostok a attiré l'attention des chercheurs qui ont entrepris de déterminer par analogie l'activité microbienne qui pourrait exister sous la surface glacée d'Europe. Même si les « analogies » mettent en corrélation les travaux sur le terrain terrestre avec les environnements non terrestres, il n'existe pas de règles claires ni de critères qui permettraient de déterminer la pertinence ou l'adéquation des corrélations. En collaboration avec Richard Soare, étudiant de maîtrise en sciences, j'ai fait une évaluation systématique des critères à appliquer aux analogues planétaires et de la valeur du lac Vostok en tant qu'analogue d'Europe.

Activité microbienne sous les nappes glaciaires et ses effets sur l'environnement sous-glaciaire
Martin Sharp
Département des sciences de la terre et de l'atmosphère, Université de l'Alberta
Julia Foght
Département des sciences biologiques, Université de l'Alberta

Martin Sharp a 22 années d'expérience de la recherche sur les processus et les environnements sous-glaciaires de l'Islande, de l'Alaska, de la Norvège, des Alpes, des Montagnes rocheuses canadiennes et de l'Extrême-Arctique canadien. Durant cette période, il a travaillé sur les propriétés physiques des sédiments sous-glaciaires, sur les propriétés et la

genèse des séquences de glace à la base porteuse de débris et sur les caractéristiques et le comportement des systèmes hydrologiques sous-glaciaires (à l'aide de diverses méthodes telles que le marquage par colorants et radio-isotopes ou celles faisant appel à l'hydrochimie des eaux de fonte, aux instruments d'études sous-glaciaires et de forage ou au sondage par écho radio). Plus récemment, il a effectué des études en biogéochimie sous-glaciaire et sur le cycle du carbone (à l'aide d'analyses des ions principaux, des isotopes C, O, H, S et Sr, et du carbone organique dissous), du comportement des polluants organiques et du mercure persistants dans les systèmes glaciaires (avec David Schindler, Jules Blais et Vincent St. Louis), ainsi que sur la nature et l'existence de la vie microbienne dans et sous les glaciers (avec Julia Foght, Mark Skidmore et Brian Lanoil). Ces études ont consisté à examiner les environnements dans lesquels vivent des micro-organismes, les types d'organismes présents (à l'aide de techniques d'analyse moléculaire et de culture), leur viabilité et leur fonction biogéochimique en conditions in-situ et à rechercher des preuves d'activité in-situ.

Julia Foght est une microbiologiste des régions froides qui s'intéresse à la dégradation microbienne du pétrole brut et des produits raffinés du pétrole à basse température. Ses travaux portent plus spécifiquement sur les aspects génétiques moléculaires de la dégradation bactérienne des hydrocarbures aromatiques polycycliques, en accordant une importance particulière aux facteurs qui contrôlent la dégradation et aux méthodes susceptibles d'augmenter la capacité des bactéries à dégrader de tels polluants dans l'environnement. Ces travaux ont consisté à isoler des souches de bactéries de leur environnement et à en faire muter les gènes portés par leurs plasmides et(ou) leurs chromosomes. Julia Foght a étudié la dégradation du pétrole brut par des populations mixtes, des souches de culture pures et des mutants génétiques. Cela comprenait la démonstration de la perte en composés d'origine et l'analyse des produits résiduels de l'attaque bactérienne sur les pétroles bruts, en utilisant surtout la chromatographie en phase gazeuse, la spectrométrie de masse et la radiorespirométrie. Elle a travaillé avec des chercheurs néo-zélandais sur la dégradation des hydrocarbures dans les sols contaminés de l'Antarctique par du carburant. Récemment, elle a participé avec Sharp, Skidmore et Lanoil à la caractérisation des populations microbiennes sous-glaciaires de l'Arctique canadien.

En ce qui concerne les travaux à venir, nous avons l'intention d'examiner la question suivante : *« Que font les microbes sous les nappes glaciaires et quels sont les effets de leur activité sur la chimie de leur environnement? »*. Pour y répondre, nous devrons mener des études dans trois domaines : la microbiologie moléculaire (avec caractérisation de l'ADN des micro-organismes sans avoir à les cultiver), les cultures conventionnelles (afin d'observer les activités des organismes ou de les déduire en les cultivant) et la géochimie en phase aqueuse à basse température (pour déterminer les sources d'énergie et les potentiels d'oxydoréduction qui favorisent la vie, ainsi que l'impact de l'activité microbienne sur la chimie des eaux et des glaces dans lesquelles se trouvent les populations d'organismes).

Bien qu'il soit possible de mener des études de microbiologie moléculaire à l'Université de l'Alberta, il serait préférable de les confier à un laboratoire spécialisé au Canada ou à Brian Lanoil (NASA-Jet Propulsion Laboratory), avec qui nous collaborons. Julia Foght se chargerait des cultures conventionnelles à l'appui de ces études et Martin Sharp, des analyses liées à la chimie des ions principaux, des isotopes et du carbone organique des eaux et des glaces. Nos buts seraient d'étudier les activités aérobie et anaérobie des processus hétérotrophes et autotrophes (les premiers utilisant le carbone organique et les seconds fixant le CO_2) afin d'évaluer l'activité microbienne in-situ, dans le cadre d'expériences de culture sous des

conditions de température et de pression quasi semblables à celles trouvées sur le terrain et, en fin de compte, de déterminer les sources d'énergie et les couples d'oxydoréduction qui favorisent la vie dans les environnements sous-glaciaires profonds. Ces travaux contribueraient aux efforts constants déployés pour comprendre les écosystèmes soutenus par le carbone « ancien », plutôt que par la production primaire. De tels écosystèmes pourraient avoir été alimentés en carbone par la forêt boréale, qui a été remplacée par les nappes de glace de latitude moyenne au cours du pléistocène; ils auraient pu aussi avoir joué un rôle critique dans le maintien de la vie pendant les périodes de « Terre boule de neige » de l'ère protérozoïque. De plus, ils pourraient être analogues aux types d'écosystèmes qui pourraient exister sous les calottes polaires de Mars et la plateforme de glace flottante sur Europe.

Virus indicateurs dans la glace profonde et lacs sous-glaciaires indicateurs de changement climatique mondial

Curtis Suttle
Département d'océanographie, Université de Colombie-Britannique

Peu d'éléments contenus dans la glace de glacier peuvent nous renseigner sur l'évolution des communautés biologiques et le changement climatique qui se sont produits sur des centaines de milliers d'années. Des indicateurs possibles sont les particules virales. Les virus sont constitués d'ADN et d'ARN extrêmement petits (environ 25 à 300 nm de diamètre) dont les particules n'ont aucun métabolisme à l'extérieur de leur hôte. Sans métabolisme, il est peu probable que leur composition génétique ait changé pendant leur séjour dans la glace. Extrêmement abondants dans la biosphère, à des concentrations variant de 1 à 100 millions par ml dans les océans et les lacs, ils sont les entités biologiques les plus nombreuses sur la planète. De plus leurs acides nucléiques leur donnent des signatures génétiques distinctes qui permettent d'examiner les changements de structure subis par les communautés au fil du temps.

La petite taille et l'abondance élevée des particules virales indiquent qu'elles peuvent facilement former des aérosols et être transportées dans l'atmosphère. La preuve que des virus ont été transportés et déposés dans la glace a été récemment apportée, lorsque des signatures génétiques de phytovirus ont été trouvées dans des composantes de glace de glacier du Groenland (Castello et al., 1999). De récentes observations faites dans mon laboratoire sur de la glace vieille de 7 000 ans provenant de l'île Ellesmere indiquent que les virus sont des composantes relativement abondantes (milliers par cc). Il en découle que nous pourrions utiliser des approches moléculaires modernes pour retracer les changements de structure des communautés de virus dans la glace sur des périodes relativement longues. De plus, il devrait être assez simple d'examiner des virus dans des échantillons d'eau prélevés dans des lacs sous-glaciaires et de comparer leurs signatures génétiques à celles relevées pour des groupes de virus connus.

L'approche que nous avons adoptée pour l'examen de la diversité génétique des communautés virales en eau de mer (Short et Suttle, 2000; Short et Suttle 1999) pourrait servir à caractériser les communautés de virus dans des carottes de glace et des lacs sous-glaciaires. Des techniques empruntées à la biologie moléculaire (réaction en chaîne de la polymérase et dénaturation des gradients par électrophorèse en gel) sont utilisées pour amplifier les fragments de gènes de groupes spécifiques de virus. L'analyse de ces empreintes et séquences génétiques permettrait de déterminer comment la composition des communautés virales a évolué avec le temps. Les changements de structure de ces communautés sont probablement associés à des

événements climatiques qui modifient la composition des micro-organismes qui sont les hôtes primaires de ces virus. En outre, les périodes de sécheresse ou de précipitations accrues devraient avoir eu pour effet de changer la composition des types de virus entraînés dans l'atmosphère.

En bout de ligne, il devrait être possible d'associer des groupes spécifiques de virus à des périodes climatiques spécifiques de la planète. Ainsi, on pourrait en apprendre davantage sur la composition des microbes qui sont les hôtes de ces pathogènes obligatoires.

Écologie microbienne polaire

Warwick F. Vincent
Centre d'études nordiques, Université Laval

Notre groupe de recherche limnologique travaille principalement sur la façon dont les changements de l'environnement physique (climat, UV, irradiation spectrale, cycles jours-nuits, température, mélange) influent sur la régulation des écosystèmes lacustres et fluviaux. Nos études portent plus particulièrement sur les communautés algales et microbiennes à la base des réseaux trophiques aquatiques, surtout dans les régions polaires nord et sud où l'environnement physique exerce une influence considérable sur tous les processus écologiques (Vincent et Hobbie, 2000). Nous nous intéressons plus généralement à l'écologie microbienne polaire (p. ex., Vincent, 1998; Vincent et Howard-Williams, 2000) et à d'autres questions touchant la biogéographie et l'endémisme microbien, c'est-à-dire à la possibilité que certaines espèces microbiennes aient pu évoluer et se maintenir uniquement dans des régions géographiques bien délimitées. Les travaux récents de microbiologie sur la glace profonde au-dessus du lac Vostok sont particulièrement intéressants à cet égard (Vincent, 2000a, Vincent, 2000b). Mon collègue, le professeur Reinhard Pienitz, dirige une équipe de recherche paléolimnologique dans notre groupe et analyse des carottes de sédiments prélevées dans des lacs de haute latitude pour l'obtention d'indices historiques sur la façon dont les propriétés des lacs et des bassins hydrographiques ont évolué dans le passé (p. ex., Pienitz et Vincent, 2000). Les sédiments anciens du lac Vostok et d'autres lacs sous-glaciaires fourniront des informations fascinantes de ce type.

Quatre de nos domaines d'intérêts pourraient se rattacher à des travaux futurs sur la glace profonde et les lacs sous-glaciaires : 1) Notre observation de l'environnement physique comprend l'utilisation et l'interprétation de données obtenues à l'aide de divers ensembles d'instruments, ce qui inclut des appareils robots sous-marins (véhicules sous-marins autonomes conçus par notre collaborateur, Michio Kumagai, pour le lac Biwa, au Japon) et des capteurs bio-optiques (tels que des capteurs optiques de rétrodiffusion automatisés pour la détermination de la turbidité, incorporés à des instruments fabriqués par RBR Ltd, d'Ottawa, et utilisés tous les étés par notre groupe, dans l'estuaire du fleuve Saint-Laurent). Les caractéristiques de ces instruments pourraient servir à la conception de systèmes d'exploration de lacs sous-glaciaires. 2) Une grande partie de nos recherches concerne les cyanobactéries, un groupe de micro-organismes qui se retrouvent partout sur la planète, mais qui sont particulièrement abondants dans l'Arctique et dans l'Antarctique (Tang et al., 1997; Mueller et al., 2001). Ces organismes sont phototrophes, ce qui veut dire que leur source d'énergie est la lumière solaire. Par conséquent, on ne devrait pas trouver de tels organismes dans les environnements sans lumière des lacs sous-glaciaires. Néanmoins, nos recherches sur ces communautés visent actuellement à déterminer les propriétés micro-environnementales de leurs habitats locaux (Villeneuve et al.,

2001), et certaines de nos bio-analyses pourraient être appliquées aux micro-habitats dans la glace profonde et dans les lacs sous-glaciaires. 3) Nous nous intéressons de près à la façon dont les extrêmophiles (espèces microbiennes qui vivent dans des conditions environnementales extrêmes) survivent sur et dans la glace, et nos travaux courants portent en grande partie sur la plateforme glaciaire de l'île Ward Hunt, dans l'Extrême-Arctique canadien (Vincent et al., 2000). Ce site contient une glace épaisse (>10 m) flottant sur la mer, et il pourrait être utile pour le perfectionnement des technologies d'exploration de la glace profonde et des lacs sous-glaciaires (comme le proposent Wuest et Carmack, 2000). De tels travaux aideraient à mieux comprendre le cryo-écosystème de Ward Hunt, qui semble être le vestige d'un système de plateformes de glace beaucoup plus étendu qui occupait le littoral Nord de l'île Ellesmere au début du 20ème siècle (Vincent et al, 2001). 4) Enfin, nous portons un intérêt général à la protection environnementale des lacs de haute latitude et de leur bassin hydrographique, et nous avons contribué à l'élaboration de codes d'éthique environnementaux en matière de recherche dans de telles régions (p. ex., Vincent, 1996).

3 Progrès relatifs aux intérêts canadiens dans la recherche sur les lacs sous-glaciaires et les glaces profondes en Antarctique

Nicole Couture, rapporteur

Au cours des présentations et des débats, plusieurs thèmes ont été mentionnés. La deuxième moitié du colloque leur a été consacrée.

Expertise canadienne et possibilités pour la recherche à l'avenir

Il faudra surmonter un certain nombre de défis scientifiques et technologiques pour pouvoir prélever des échantillons de lacs sous-glaciaires. Bon nombre de scientifiques estiment qu'il faudra attendre au moins une décennie pour qu'une grande partie des problèmes soit réglée. Dans l'intervalle, il y a de nombreuses possibilités de recherche. Plusieurs champs d'activités où les Canadiens pourraient se concentrer ont été mentionnés au cours des discussions. Les personnes présentes au colloque ne travaillent pas toutes à l'exploration des lacs sous-glaciaires ou des glaces profondes, mais une grande partie de leur recherche peut être directement applicable à cette activité.

Technologie

Un certain nombre de technologies doivent être mises au point pour le prélèvement d'échantillons des lacs sous-glaciaires. Exemple : une entreprise canadienne a conçu des foreuses à injection d'eau chaude « propres »; mais actuellement ces appareils peuvent seulement pénétrer dans la glace à environ 2,5 km, et il faudra poursuivre les travaux pour pouvoir forer dans une épaisseur de 3 ou 4 km et atteindre les lacs sous la nappe glaciaire de l'Antarctique de l'Est. Les méthodes d'obturation du trou d'accès à appliquer après le prélèvement des échantillons doivent être perfectionnées. Les instruments de recherche océanographique standard peuvent être utilisés pour une grande partie des mesures in situ dans les lacs, même si on se demande s'ils seront assez sensibles pour un tel milieu. Il y a donc des possibilités de réaliser des progrès technologiques dans le perfectionnement de ces instruments. La nécessité de mettre au point des instruments plus sophistiqués pour l'échantillonnage in situ de la glace, de l'eau et des sédiments, peut-être à l'aide des nanotechnologies, présente d'autres défis. Il faut aussi concevoir la technologie d'extraction des échantillons, et les chercheurs

pourraient essayer de résoudre les problèmes dus aux grandes différences de pression, entre autres. Une recherche sur les engins télécommandés et les capteurs pour les travaux sous l'eau s'impose également. Les données du RADARSAT sont disponibles, et plusieurs chercheurs du pays et de l'étranger les utilisent. Les Canadiens pourraient jouer un rôle plus important dans ce domaine.

Microbiologie

Les scientifiques canadiens connaissent bien le domaine de l'analyse des communautés microbiennes dans un milieu gelé. Leurs travaux de recherche portent sur les épreuves métaboliques, les essais sur des organismes vivants/morts, les estimations de la biomasse, la caractérisation génétique et l'analyse des fonctions biogéochimiques. Cette expertise peut être appliquée pour obtenir une meilleure compréhension de la diversité microbienne et de la fonction structurelle des communautés microbiennes dans les lacs et les sédiments sous-glaciaires, dans la glace qui les recouvre et à la surface. La mise en culture des micro-organismes prélevés dans le lac présente un défi, et il faut mettre au point des techniques expérimentales d'analyse.

Modélisation

Les scientifiques canadiens cherchent à améliorer la compréhension de la dynamique de la nappe glaciaire comme telle, au moyen de l'altimétrie à haute définition et de l'élaboration de modèles thermomécaniques 3D perfectionnés. En outre, il est possible de combiner les modèles sur la dynamique de la glace aux modèles tridimensionnels de circulation en fonction du temps pour les lacs et les modèles d'hydrologie sous-glaciaire. Les études de modélisation des environnements sous-glaciaires peuvent être perfectionnées au moyen des ensembles de données physiques, chimiques et biologiques provenant des études menées sur le terrain ou par des expériences en laboratoire contrôlées. Il faudrait, par exemple, faire des recherches plus poussées sur les processus de fusion/congélation à la voûte des lacs sous-glaciaires. Les études en laboratoire pourraient porter sur l'effet des propriétés de la glace sur l'habitat microbien et le rôle des impuretés que renferme l'eau dans les processus de nucléation et de croissance de la glace dans les lacs sous-glaciaires.

La modélisation peut être un excellent moyen de mieux comprendre les processus complexes et de planifier les expériences pertinentes en laboratoire et sur le terrain. Cela est particulièrement vrai lorsqu'on étudie les environnements exotiques comme les lacs sous-glaciaires pour lesquels nous possédons peu de données de terrain, compte tenu de la difficulté d'obtenir des renseignements supplémentaires et du coût exorbitant des opérations.

Préoccupations environnementales :

Des groupes d'écologistes ont manifesté leur opposition à l'exploration des lacs sous-glaciaires à cause du risque de contamination des lacs qui n'ont jamais été altérés par l'intervention humaine. Les scientifiques qui veulent explorer les lacs sous-glaciaires doivent tenir compte de ces préoccupations et les atténuer. Il importe de se pencher sur les questions environnementales non seulement dans le contexte des technologies de forage, mais aussi dans une optique tenant compte des répercussions sur l'environnement, de la modélisation et de la décontamination, et des protocoles. Les Canadiens ont aidé à établir des codes d'éthique environnementale pour les lacs et les bassins hydrographiques à haute latitude, et la poursuite des travaux dans ce domaine intéresse les responsables. Les études en biorestauration offrent

aussi des possibilités, tout comme l'intérêt pour la répartition des contaminants dans les lacs et leur bassin hydrographique. La décontamination des matériaux qui pénètrent dans le lac et qui en sortent intéresse particulièrement les responsables, et il faudrait perfectionner les procédures à appliquer. Il faut aussi tenir compte des préoccupations environnementales lorsqu'on prépare de nouvelles technologies d'exploration et d'échantillonnage.

La recherche sur l'Arctique comme prélude à la recherche sur les lacs sous-glaciaires et les glaces profondes de l'Antarctique

Les spécialistes ont indiqué que l'accès facile à une variété d'environnements glaciaires dans l'Arctique canadien présentait un avantage majeur pour la contribution du Canada à l'exploration des lacs sous-glaciaires et des glaces profondes. Sur le plan international, les études en cours et celles qui seront menées dans l'Arctique et aux monts Saint Elias, au Yukon, peuvent prouver la crédibilité et l'utilité de nos recherches dans le domaine. Grâce à la facilité d'accès et au faible coût des opérations dans le Nord canadien, il est plus facile pour les Canadiens de réaliser leurs programmes de recherche et d'essai. En outre, ces avantages amèneront de nouvelles possibilités de coopération et d'association internationales, car les scientifiques de l'étranger pourraient vouloir profiter des mêmes avantages. Le compte rendu du colloque tenu par le CSRA en 1999, à Cambridge, recommandait l'utilisation d'endroits analogues plus accessibles, comme ceux qui existent dans les régions nordiques, pour tester les nouvelles technologies. Plusieurs endroits dans l'Arctique canadien ont été proposés comme milieux analogues convenables, notamment la plateforme glaciaire de l'île Ward Hunt, Phantom Lake, le glacier Cadogan et le glacier John Evans.

Communication aux niveaux national et international

Le bulletin de nouvelles du CCRA (tirage de plus de 400 exemplaires) a été reconnu comme véhicule de diffusion de l'information sur les progrès et les possibilités de la recherche sur les lacs sous-glaciaires et les glaces profondes. Cependant, les intéressés estiment qu'il faut mettre en œuvre des moyens plus proactifs. On a proposé de créer un réseau de scientifiques intéressés sur le Web. Ce réseau inclurait les personnes présentes au colloque, celles qui n'ont pas pu y assister et des inconnus. Au début, il faciliterait l'échange de renseignements et d'idées. Ce serait le principal point de contact pour les organismes internationaux impliqués dans la recherche sur les lacs sous-glaciaires et les glaces profondes. Il serait administré par la CCAP. Un comité directeur composé de Warwick Vincent et de Wayne Pollard (président sortant et nouveau président du CCRA, respectivement) a été formé pour examiner cette option.

Possibilités de financement

Il existe plusieurs sources de financement pour ce genre de recherche. Le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) serait la principale source de financement pour la recherche universitaire. Le Conseil administre plusieurs programmes pertinents, notamment le programme de réseaux de recherche, la Fondation canadienne pour l'innovation, le Programme de subventions d'occasions de recherche concertée et le Programme de recherche nordique. Certains programmes financent les colloques pour la planification et le développement des programmes de recherche. Les scientifiques du gouvernement peuvent obtenir des fonds des ministères à vocation scientifique : Ressources naturelles Canada (RNCan – par l'entremise du Programme d'échange Arctique-Antarctique de

l'Étude du plateau continental polaire), Environnement Canada et le ministère des Pêches et Océans (MPO). Il est aussi possible d'obtenir un financement du programme Études conceptuelles et au sol en sciences de la vie et dans l'espace de l'Agence spatiale canadienne. Le ministère des Affaires étrangères et du Commerce international (MAECI) a des programmes qui visent à renforcer les liens scientifiques et technologiques avec la collectivité internationale. Ces programmes pourraient s'appliquer aux étapes de la conception et de la planification du programme de recherche.

Les organismes de financement susmentionnés sont importants pour le milieu universitaire et les scientifiques du gouvernement, mais le secteur privé offre aussi des possibilités de financement par l'entremise du Conseil national de recherches et du ministère de l'Industrie. Les bourses en milieu industriel du CRSNG peuvent servir au perfectionnement des technologies.

Enfin, les gouvernements territoriaux pourraient consentir à financer certaines activités dans le Nord. Il faudrait cependant faire savoir que la recherche dans l'Arctique est le point de départ pour la science à l'échelle mondiale et souligner les aspects éducatifs ou d'intérêt public de la recherche.

Aux étapes initiales du programme, nous estimons que le financement proviendra surtout des sources canadiennes, mais les partenaires internationaux qui participent à des programmes conjoints pourraient fournir une contribution. Les étapes ultérieures, qui comprendront des travaux d'envergure coûteux sur le terrain en Antarctique, nécessiteront vraisemblablement la création d'un grand consortium international.

4 Mot de la fin

Warwick Vincent, président, CCRA

Cette réunion a attiré l'attention sur la diversité de l'expertise en recherche sur les glaces profondes et le perfectionnement des technologies, d'un bout à l'autre du Canada, et sur les talents qui pourraient servir à une contribution canadienne au travail international dans ce domaine. Il faudra sans doute attendre quelques années pour pouvoir réaliser un nouveau programme de forage axé sur le prélèvement d'échantillons des lacs sous-glaciaires en Antarctique, car il faut d'abord faire des travaux de recherche-développement considérables. Une grande partie des travaux pourraient être réalisés à des endroits analogues plus faciles d'accès. C'est pourquoi il serait utile de renforcer la capacité de recherche canadienne (avec la collaboration internationale) dans le Nord canadien et d'envisager de faire plus tard des études de l'environnement glaciaire extrême, dans la région polaire du Sud. Outre les opérations sur le terrain, il faut prévoir d'importants travaux de modélisation et études en laboratoire.

À ce colloque, tous les participants ont souligné un thème commun, soit l'intérêt pour la recherche sur les glaces profondes : glaciers, nappes glaciaires, plateformes de glace, glace au sol, etc. Certains participants s'intéressent davantage à la couche de glace de surface plutôt qu'aux processus qui se déroulent dans le fond, aux micro et macro environnements de l'eau liquide plutôt qu'à la glace environnante, à la glace côtière épaisse plutôt qu'au plateau polaire, aux technologies d'échantillonnage plutôt qu'à l'analyse des échantillons, ou à la modélisation plutôt qu'aux mesures sur le terrain. Les réseaux mentionnés dans ce compte rendu devraient autant que possible englober cette diversité d'intérêts et établir des liens avec les spécialistes qui s'intéressent à la vie dans les environnements glaciaires extrêmes. En toute logique, un tel réseau devrait s'attacher au renforcement de la capacité scientifique et technologique dans le Nord et considérer les activités en Antarctique pour le long terme.

En général, le Canada est bien placé pour pouvoir participer davantage à la recherche sur les lacs sous-glaciaires et les glaces profondes. Compte tenu de l'expertise canadienne actuelle, nous pouvons profiter des nombreuses possibilités exaltantes. Plusieurs créneaux pourraient être exploités. La facilité relative d'accès aux sites dans l'Arctique pour la recherche sur le terrain et les programmes d'essai atténuent les obstacles logistiques et financiers à la participation aux recherches en Antarctique. La création d'un groupe de travail sur l'exploration des lacs sous-glaciaires et des glaces profondes aidera à consolider et à étendre les intérêts du Canada, à l'échelle nationale et internationale

Pour terminer, j'aimerais remercier tous ceux qui ont rendu l'organisation de ce colloque possible : Olav Loken, secrétaire du CCRA, qui a veillé à l'organisation et à la bonne marche de cette réunion productive, Nicole Couture, pour son excellent travail de rapporteur, et tous les participants pour leurs présentations et leurs interventions stimulantes. Je remercie la Commission canadienne des affaires polaires qui nous permet d'utiliser ses locaux et qui appuie continuellement les activités du CCRA, ainsi que le ministère des Affaires étrangères et du Commerce international qui, avec la CCAP, a financé cette réunion. Si vous avez d'autres commentaires sur les questions soulevées dans ce compte rendu, veuillez communiquer avec nous.

Références

(Les noms des scientifiques canadiens sont soulignés)

Abyzov, S.S., I.N. Mitskevich et M.N. Poglazova. 1998. Microflora of the deep glacier horizons of central Antarctica. *Microbiology* 67, 66-73.

Blatter, H., G. K. C. Clarke et J. Colinge. 1998. Stress and velocity fields in glaciers: Part II. sliding and basal stress distribution. *Journal of Glaciology*, 44, 457-466.

Carmack, E. et J. Wüest. 2000. Examen du lac Vostok. *Bulletin du Réseau canadien de recherches antarctiques* 10: 1-2.

Castello, J.D., S.O. Rogers, W.T. Starmer, C.M. Catranis, L. Ma, G.D. Bachand, Y. Zhao, J.E.Smith, 1999: Detection of tomato mosaic tobamovirus RNA in ancient glacial ice. *Polar Biol.* 22: 207-212

Cuffey, K. M. et S. J. Marshall, 2000. Substantial contribution to sea-level rise during the last interglacial from the Greenland Ice Sheet. *Nature*, 404, 591-593.

Dowdeswell, J.A. et M.J. Siegert, 1999, The Dimensions and topographic setting of Antarctic subglacial lakes and implications for large-scale water storage beneath continental ice sheets: *Geological Society of America Bulletin*, 111, 254-263.

Gorman, M.R. et M.J. Siegert, 1999, Penetration of Antarctic subglacial lakes by VHF electromagnetic pulses: information on the depth and electrical conductivity of basal water bodies: *Journal of Geophysical Research*, 104, 29311-29320.

Jean Baptiste, P., J.R.Petit, V.Ya. Lipenkov, D. Raynaud et N.I. Barkov, 2001. Helium isotope in deep Vostok ice core (Antarctica): constraints on hydrothermal processes and water exchange in the subglacial lake, *Nature*, en cours d'impression.

Jouzel, J. et 9 auteurs. 1999. More than 200 meters of lake ice above subglacial LakeVostok, Antarctica. *Science*, 286, 2138-2141.

Junge, K., C. Krembs, J. Deming, A. Stierle et H. Eicken. A microscopic approach to investigate bacteria under in-situ conditions in sea-ice samples. *Ann. Glaciol.*, 33, en cours d'impression.

Kapitsa, A., J.K. Ridley, G. de Q. Robin, M.J. Siegert et I. Zotikov, 1996, Large deep freshwater lake beneath the ice of central East Antarctica: *Nature*, 381, 684-686.

Karl, D.M., D.F. Bird, K. Björkman, T. Houlihan, R. Shackelford et L. Tupas. 1999. Microorganisms in the accreted ice of Lac Vostok, Antarctica. *Science* 286: 2144-2147.

Lanoil, B.D., M. Sharp, S.P. Anderson, M.T. La Duc, J. Foght et K.H. Nealson. 2001. A comparative study of microbial communities under two glaciers. 101e assemblée annuelle de l'American Society for Microbiology, Orlando FL (résumé accepté).

Lipenkov, V.Ya et N.I. Barkov, 1998, Internal structure of the Antarctic ice sheet as revealed by deep core drilling at Vostok station, dans « Lake Vostok Study: Scientific Objectives and technological requirements », compte rendu de la réunion de Saint-Petersbourg, institut de recherche sur l'Arctique et l'Antarctique, mars 1998, p. 31-33.

Marshall, S.J. et G.K.C. Clarke, 1997. A continuum mixture model of ice stream thermomechanics in the Laurentide Ice Sheet 1. Theory. *Journal of Geophysical Research*, 102(B9), 20,599-20,614.

Marshall, S. J. et K.M. Cuffey, 2000. Peregrinations of the Greenland Ice Sheet divide in the last glacial cycle: Implications for central Greenland ice cores. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 179, 73-90.

Mueller, D., W.F. Vincent, W.H. Pollard.et C.H. Fritsen. 2001. Glacial cryoconite ecosystems: A bipolar comparison of algal communities and habitats. Dans : Lhotsky, O., J. Elster, J. Seckbach, et W.F. Vincent, W.F. (éd.) Algae in Extreme Environments. Nova Hedwigia (en cours d'impression).

Oswald, G. et G. Robin, 1973, Lakes beneath the Antarctic Ice Sheet: *Nature*, 245, 251-254.

Petit, J.R., I. Basile, J. Jouzel, N.I. Barkow, V. Ya. Lipenkov, R.N. Vostretsov, N.I. Vasiliev, C. Rado, 1998. Preliminary investigations and implications from the 3623 metres Vostok deep ice core studies. *Lake Vostok Study: Scientific Objectives and Technological Requirements, International Workshop*, institut de recherche sur l'Arctique et l'Antarctique, Saint-Petersbourg, Russie, 43.

Petit, J.R., J. Jouzel, R.D. Raynaud, N.I. Barkow, J.M. Barnole, I. Basile, M. Benders, J. Chappellaz, M. David, G. Delaygue, M. Delmotte, V.M. Kotlyakov, M. Legrand, V. Ya. Lipenkov, C. Lorius, L. Pepin, C. Ritz, E. Saltzmann et M. Stievenard, 1999. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 399, 429-436.

Pienitz, R. et W.F. Vincent, 2000. Effect of climate change relative to ozone depletion on UV exposure in subarctic lakes. *Nature* 404: 484-487.

Pomeroy, L.R. et W.J. Wiebe, 2001. Temperature and substrates as interactive limiting factors for marine heterotrophic bacteria. *Aquat. Microb. Ecol.* 23: 187-204.

Priscu, J. C. et 12 auteurs. 1999. Geomicrobiology of subglacial ice above Lake Vostok, Antarctica. *Science*, 286, 2141-2144.

Short, S.M. et C.A. Suttle. 1999. Use of the polymerase chain reaction and denaturing gradient gel electrophoresis to study diversity in natural virus communities. *Hydrobiologia* 401:19-33

Short, S.M. et C.A. Suttle, 2000. Denaturing gradient gel electrophoresis resolves virus sequences amplified with degenerate primers. *BioTechniques* 28:20-26

Siegert, M.J. Antarctic subglacial lakes, 2000, *Earth Science Reviews*, 50, 29-50.

Siegert, M.J. et J.L. Bamber, 2000, Subglacial lakes at the heads of Antarctic ice stream tributaries. *Journal of Glaciology*, 46, 702-703.

Siegert, M.J. et J.A. Dowdeswell, 1996, Spatial variations in heat at the base of the Antarctic Ice Sheet from analysis of the thermal regime above sub-glacial lakes: *Journal of Glaciology*, 42, 501-509.

Siegert, M.J. et J.K. Ridley, 1998a, An analysis of the ice-sheet surface and subsurface topography above the Vostok Station subglacial lake, central East Antarctica: *Journal of Geophysical Research*, 103, 10195-10207.

Siegert, M.J. et J.K. Ridley, 1998b, Determining basal ice sheet conditions at Dome C, central East Antarctica, using satellite radar altimetry and airborne radio-echo sounding information: *Journal of Glaciology*, 44, 1-8.

Siegert, M.J., J.A. Dowdeswell, M.R. Gorman et N.F. McIntyre, N.F., 1996, An inventory of Antarctic sub-glacial lakes: *Antarctic Science*, 8, 281-286.

Siegert, M.J., R. Kwok, C. Mayer et B. Hubbard, 2000. Water exchange between subglacial Lake Vostok and the overlying ice sheet: N*ature*, 403, 643-646

Sharp, M., J. Parkes, B. Cragg, I.J. Fairchild, H. Lamb et M. Tranter, 1999. Widespread bacterial populations at glacier beds and their relationship to rock weathering and carbon cycling. *Geology* 27, 107-110.

Short et Suttle 1999, *Hydrobiologia* 401, 19-32

Short et Suttle 2000, *Biotechniques* 28, 20-26

Skidmore, M.L., J.M. Foght et M.J. Sharp, 2000. Microbial life beneath a High Arctic glacier. *Applied and Environmental Microbiology* 66, 3214-3220.

Souchez, R., J.R. Petit, J.-L. Tison, J. Jouzel et V. Verbeke. 2000. Ice formation in subglacial Lake Vostok, Central Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters*, 181, 529-538.

Tang, E.P.Y., R. Tremblay, et W.F. Vincent, 1997. Cyanobacterial dominance of polar freshwater ecosystems: are high latitude mat-formers adapted to the low temperature environment? *Journal of Phycology* 33: 171-181.

Tiedje, J.M. 1999. Exploring microbial life in Lake Vostok. Pp. 19-21, in Lake Vostok Workshop: Final Report. Lake Vostok : A curiosity or a focus for interdisciplinary research. (colloque parrainé par la NSF, Washington, D.C., 7-8 nov. 1998).

Tyler, S.W., P.G. Cook, A.Z. Butt, J.M. Thomas, P.T. Doran et W.B.Lyons. 1998. Evidence of deep circulation in two perennially ice-covered Antarctic lakes. *Limnol. Oceanogr.* 43: 625-635.

Villeneuve, V., W.F. Vincent, et J. Komarek, 2001.Community structure and microhabitat characteristics of cyanobacterial mats in an extreme high Arctic environment: Ward Hunt Lake (lat. 82.8 °N). In: Lhotsky, O., Elster, J., Seckbach, J., & Vincent, W.F. (éd.) Algae in Extreme Environments. (en cours d'impression).

Vincent, W.F. 1988. Microbial Ecosystems of Antarctica. Cambridge University Press, Royaume-Uni. 304 pp.

Vincent, W.F. (éd.) 1996. Environmental Management of a Cold Desert Ecosystem: the McMurdo Dry Valleys, Antarctica. Desert Research Institute, University of Nevada Special Publication 55 pp.

Vincent, W.F. 1999: Antarctic Biogeochemistry: Icy life on a hidden lake. *Science* 286: 2094-95.

Vincent, W.F. 2000a. De la vie dans le lac Vostok? *La Recherche*, Mar.14-16.

Vincent, W.F. 2000b. Evolutionary origins of Antarctic microbiota: invasion, selection and endemism. *Antarctic Science* 12: 374-85

Vincent, W.F. et J.A. Hobbie, 2000. Ecology of Arctic lakes and rivers. In: M. Nuttall and T. V Callaghan (éd.) The Arctic: Environment, People, Policies, Harwood Academic Publishers, R.-U. p. 197-231.

Vincent, W.F. et C. Howard-Williams, 2000. Life on Snowball Earth. *Science* 287: 2421.

Vincent, W.F., J.A.E. Gibson et M. Jeffries, 2001. Ice shelf collapse, climate change and habitat loss in the Canadian High Arctic. *Polar Record* 37: 133-142.

Vincent, W.F., J.A.E. Gibson, R. Pienitz, V. Villeneuve, P.A. Broady, P.B. Hamilton et C. Howard-Williams, 2000 Ice shelf microbial ecosystems in the high Arctic and implications for life on snowball earth. *Naturwissenschaften* 87: 137-141.

Wüest, A. et E. Carmack. 2000. A priori estimates of mixing and circulation in the hard-to-reach water body of Lake Vostok. *Ocean Modelling*, 2, 29-43.

ANNEXE A – Participants au colloque

P[r] David Bird, Département des sciences biologiques, université du Québec à Montréal
Case postale 8888 Centre-Ville, MONTRÉAL QC , H3C 3P8
Tél. : (514) 987-3000, poste 7859
Téléc. : (514) 987- 4647
Courriel : bird.david@uqam.ca

M. Erik Blake, Icefield Instruments Inc., 3C Glacier Rd., WHITEHORSE, YT, Y1A 5S7
Tél. : (867) 633-4264
Téléc. : (867) 633-4217
Courriel : erik@icefield.yk.ca

P[r] Garry Clarke, Département des sciences de la Terre et des océans, Université de la Colombie-Britannique
129, 2219 Main Mall, VANCOUVER BC, V6T 1Z4
Tél. : (604) 822-3602
Téléc. : (604) 822-6047
Courriel : clarke@eos.ubc.ca

Mme Kathleen Conlan, Musée canadien de la nature, C.P. 3443, succ. D
OTTAWA, ON K1P 6P4
Tél. : (613) 364-4063
Téléc. : (613) 364-4027
Courriel : Kconlan@mus-nature.ca

M[me] Nicole Couture, Étude du plateau continental polaire, 615, rue Booth, pièce 487,
OTTAWA, ON, K1A 0E9
Tél. : (613) 947-1646
Téléc. : (613) 947-1611
Courriel : ncouture@nrcan.gc.ca

M. David Fisher, Division de la science des terrains, Commission géologique du Canada,
601, rue Booth, OTTAWA, ON K1A 0E8
Tél. : (613) 996-7623
Téléc. : (613) 996-5448
Courriel : fisher@nrcan.gc.ca

M. Mahlon C. Kennicutt II, secrétaire, Groupe des spécialistes des lacs sous-glaciaires, CSRA,
Université du Texas A&M, 833 Graham Rd., COLLEGE STATION, Texas 77845-988, É.-U.
Tél. : (979) 862-2323, poste 111
Téléc. : (979) 862-2361
Courriel : mck2@gerg.tamu.edu

M. Roy Koerner, Division de la science des terrains, Commission géologique du Canada,
601, rue Booth, OTTAWA, ON, K1A 0E8
Tél. : (613) 996-7623
Téléc. : (613) 996-5448
Courriel : Rkoerner@nrcan.gc.ca

M. Olav H. Loken, Loken Consulting, 1170 Bonnie Crescent, OTTAWA ON K2C 1Z5
Tél. : (613) 225-4234
Téléc. : (613) 225-4234
Courriel : oloken@sympatico.ca

M. Shawn Marshall, Département de géographique, Université de Calgary,
ES 404, 2500 University Drive NW, CALGARY, AB, T2N 1N4
Tél. : (403) 220-4884
Téléc. : (403) 282-6561
Courriel : smarshall@ucalgary.ca

M. Jean Robert Petit, Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'environnement - CNRS
F 38402 St.-Martin-d'Hères Cedex, France
Tél. : +33-4 76 82 42 44
Téléc. : +33-4 76 82 42 01
Courriel : petit@glaciog.ujf-grenoble.fr

P[r] Wayne Pollard, Département de géographie, Université McGill,
805, rue Sherbrooke, MONTREAL, PQ , H3A 2K6
Tél. : (514) 398-4454
Téléc. : (514) 398-7437
Courriel :Pollard@felix.geog.McGill.ca

M. Fred Roots, conseiller scientifique émérite, Environnement Canada ,
351, boul. Saint-Joseph, 21[e] étage, OTTAWA, ON , K1A 0H3
Tél. : (819) 997-2393
Téléc. : (819) 997-5813
Courriel : Fred.Roots@ec.gc.ca

M. Martin Sharp, Département des sciences de la terre et des sciences atmosphériques,
Université de l'Alberta,
1-16 Earth Science Building, EDMONTON, AB, T6G 2E3
Tél. : (780) 492-4156
Téléc. : (780) 492-7598
Courriel : martin.sharp@ualberta.ca

M. Martin Siegert, Bristol Glaciology Centre, School of Geographical Sciences,
University of Bristol, BRISTOL BS8 1SS, Royaume-Uni
Tél. : +44-0117-928-8902
Téléc. : +44-0117-928-7878
Courriel : m.j.siegert@bristolac.uk

P[r] Curtis Suttle, Océanographie, Université de la Colombie-Britannique,
6270 University Blvd.
VANCOUVER BC , V6T 1Z4
Tél. : (604) 822-8610
Téléc. : (604) 822-6091
Courriel : suttle@eos.ubc.ca

P[r] Warwick Vincent, Département de biologie, Université Laval
SAINTE-FOY, QC, G1K 7P4
Tél. : (418) 656-5644
Téléc. : (418) 656-2043
Courriel : Warwick.Vincent@bio.ulaval.ca

ANNEXE B – Liste des sigles

CCAP – Commission canadienne des affaires polaires
CCRA – Comité canadien de la recherche antarctique
CGC – Commission géologique du Canada
CISA – Comité international pour les sciences arctiques
COMNAP – Conseil des directeurs des programmes nationaux relatifs à l'Antarctique
CRSH – Conseil de recherches en sciences humaines
CRSNG – Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada
CSRA – Comité scientifique pour les recherches antarctiques
EPCP – Étude du plateau continental polaire
FCI – Fondation canadienne pour l'innovation
MAECI – Ministère des Affaires étrangères et du Commerce international (Canada)
MDE – Ministère de l'Environnement (Canada)
MPO – Ministère des Pêches et Océans (Canada)
NASA – National Aeronautics and Space Administration
NIPR – National Institute of Polar Research (Japon)
NSF – National Science Foundation
RNCan – Ressources naturelles Canada
SCMO – Société Canadienne de Météorologie et d'Océanographie
SIG – Société internationale de glaciologie
UGC – Union géophysique canadienne